



TUGAS AKHIR - (MO141326)

MANAJEMEN INSPEKSI PADA *ELBOW SECTION* MILIK PT.
PERTAMINA EP *FIELD* SANGASANGA KALIMANTAN TIMUR AKIBAT
INTERNAL CORROSION-EROSION MENGGUNAKAN METODE *RISK
BASED INSPECTION (RBI)*

Herlan

NRP. 4312 100 052

Dosen Pembimbing

Dr. Eng. Yeyes Mulyadi, S.T., M.Sc.

Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D.

JURUSAN TEKNIK KELAUTAN

Fakultas Teknologi Kelautan

Institut Teknologi Sepuluh November

Surabaya 2016



FINAL PROJECT - (MO141326)

**INSPECTION MANAGEMENT OF PT. PERTAMINA EP FIELD
SANGASANGA EAST BORNEO'S ELBOW SECTION DUE TO
INTERNAL CORROSION-EROSION BY USING RISK BASED
INSPECTION (RBI) METHOD**

Herlan

NRP. 4312 100 052

Supervisors

Dr. Eng. Yeyes Mulyadi, S.T., M.Sc.

Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D.

OCEAN ENGINEERING DEPARTMENT

Faculty of Marine Technology

Sepuluh Nopember Institute of Technology

Surabaya 2016

**MANAJEMEN INSPEKSI PADA *ELBOW SECTION* MILIK PT.
PERTAMINA EP *FIELD* SANGASANGA KALIMANTAN
TIMUR AKIBAT *INTERNAL CORROSION-EROSION*
MENGUNAKAN METODE *RISK BASED INSPECTION* (RBI)**

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada Program Studi S-1 Jurusan Teknik Kelautan Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

HERLAN

NRP. 4312 100 052

Disetujui oleh:

1. Dr. Eng. Yeyes Mulyadi, S.T., M.Sc. (Pembimbing 1)

2. Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D. (Pembimbing 2)

3. Dr. Eng. Rudi W. Prastianto, S.T., M.T. (Penguji 1)

4. Agro Wisudawan, S.T., M.T. (Penguji 2)

SURABAYA, JULI 2016

**MANAJEMEN INSPEKSI PADA *ELBOW SECTION* MILIK PT.
PERTAMINA EP *FIELD* SANGASANGA KALIMANTAN TIMUR
AKIBAT *INTERNAL CORROSION-EROSION* MENGGUNAKAN
METODE *RISK BASED INSPECTION* (RBI)**

Nama Mahasiswa : Herlan
NRP : 4312100052
Jurusan : Teknik Kelautan - FTK ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Eng. Yeyes Mulyadi, S.T., M.Sc.
Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D.

ABSTRAK

Lekukan pipa (*elbow section*) memiliki potensi kerusakan akibat fenomena korosi-erosi internal lebih besar dari pada bagian lurus pipa. Hal tersebut disebabkan karena aliran fluida pada *elbow section* mengalami percepatan akibat perubahan arah penampang alir secara drastis. Semakin tinggi kecepatan aliran fluida yang melewati dinding dalam sebuah pipa, maka semakin tinggi pula laju korosi-erosi internal pada pipa tersebut. Korosi-erosi internal dapat menyebabkan penipisan pada dinding dalam *elbow section* sehingga pada akhirnya dapat mengakibatkan bencana ledakan pipa saat beroperasi. Salah satu upaya mengurangi risiko ledakan tersebut adalah dengan melakukan inspeksi secara berkala. Tugas akhir ini bertujuan untuk menentukan manajemen inspeksi pada *elbow section* yang berisiko mengalami kegagalan akibat korosi-erosi internal. Manajemen inspeksi yang direncanakan berdasarkan pada API 581 *Base Resource Document* tentang *Risk Based Inspection* (RBI). Pemodelan aliran fluida dengan *software* ANSYS CFX dilakukan untuk mengetahui nilai perubahan kecepatan lokal aliran fluida pada *elbow section*. Metode Montecarlo digunakan untuk menghitung nilai PoF sedangkan metode *semi-quantitative* RBI digunakan untuk menentukan *likelihood category* dan *consequence category*. Hasil yang didapatkan adalah keempat *elbow section* yang dievaluasi masuk kedalam kategori risiko rendah.

Kata Kunci: Manajemen Inspeksi, *Elbow Section*, *Field* Sangasanga Kaltim, Korosi-Erosi Internal, *Risk Based Inspection* (RBI).

INSPECTION MANAGEMENT OF PT. PERTAMINA EP FIELD SANGASANGA EAST BORNEO'S ELBOW SECTION DUE TO INTERNAL CORROSION-EROSION BY USING RISK BASED INSPECTION (RBI) METHOD

Name : Herlan
NRP : 4312100052
Department : Ocean Engineering - FTK ITS
Supervisors : Dr. Eng. Yeyes Mulyadi, S.T., M.Sc.
Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D.

ABSTRACT

Elbow section has greater potential of damage caused by internal corrosion-erosion phenomenon than the straight section of pipe. This is because the fluid flow in the elbow section is accelerating due to changes in cross-sectional flow direction drastically. The higher the flow rate of fluid passing through the inner wall of a pipe, the higher the rate of internal corrosion-erosion in the pipe. Internal corrosion-erosion can cause thinning of the walls of the elbow section which in turn can lead to catastrophic burst pipe during operation. One effort to reduce the risk of the explosion is to perform periodic inspection. This final project aims to determine the management inspection at the elbow section at risk of failure due to internal corrosion-erosion. Management planned inspection based on API 581 Base Resource Document on Risk Based Inspection (RBI). Modeling of fluid flow with ANSYS CFX software was conducted to determine the value of the local velocity changes in the fluid flow in the elbow section. Montecarlo method used to calculate the value PoF while semi-quantitative RBI methods used to determine the likelihood category and consequence level. The results obtained are evaluated four elbow section into the low risk category.

Keywords: Inspection Management, Elbow Section, East Borneos's Sangasanga Field, Internal Corrosion-Erosion, Risk Based Inspection (RBI).

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR	vi
UCAPAN TERIMA KASIH	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	5
1.3. Tujuan	6
1.4. Manfaat	6
1.5. Batasan Masalah	6
1.6. Sistematika Penulisan	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	9
2.1. Tinjauan Pustaka	9
2.2. Dasar Teori	14
2.2.1. Pembebanan	12
2.2.1.1. Aliran Laminar.....	16
2.2.1.2. <i>Secondary Flow</i>	16
2.2.1.3. <i>Pressure Drop</i>	17
2.2.1.4. <i>Head Loss</i>	17
2.2.1.5. <i>Vortex</i>	18
2.2.1.6. Aliran Turbulen	18
2.2.1.7. Tegangan Geser	19
2.2.1.8. Korosi dan Erosi Internal	20
2.2.2. Peluang Kegagalan	25

2.2.2.1. Moda Kegagalan	25
2.2.2.2. Simulasi Montecarlo	26
2.2.2.3. Konsekuensi Kegagalan	27
2.2.2.3.1. Menentukan Fluida Representatif dan sifat-Sifatnya	28
2.2.2.3.2. Pemilihan Ukuran Lubang Kebocoran	29
2.2.2.3.3. Estimasi Jumlah Total fluida yang Terlepas	29
2.2.2.3.4. Estimasi Laju Kebocoran	31
2.2.2.3.5. Menentukan Tipe Kebocoran.....	32
2.2.2.3.6. Penentuan Fasa Fluida Setelah Terlepas	33
2.2.3 Risiko Kegagalan	34
2.2.4 Manajemen Inspeksi	35
2.2.5 Metode <i>Risk Based Inspection</i> (RBI)	37
2.2.4 Pengembangan Rencana Inspeksi	40
2.2.6.1. Penentuan Metode Inspeksi	41
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	43
3.1. Metode Penelitian	43
3.2. Prosedur Penelitian	45
3.2.1. Studi Literatur.....	45
3.2.2. Pengumpulan Data	45
3.2.3. Pemodelan Menggunakan <i>Software</i> ANSYS FLUID FLOW CFX..	45
3.2.4. Perhitungan Laju Korosi-Erosi	45
3.2.5. Menghitung Peluang Kegagalan	46
3.2.6. Analisa Konsekuensi dengan Metode Semi-Kuantitatif RBI	46
3.2.7. Kesimpulan	47
3.2.8. Menyusun laporan	47
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN	49
4.1. Data Utama	49
4.2. Identifikasi Bahaya (<i>Hazard Identification</i>)	51
4.3. Skenario	52
4.3.1 Pemodelan Proses Korosi-Erosi Internal	52
4.3.2 Menghitung Nilai PoF dengan Simulasi Montecarlo	53

4.4. Pemodelan Struktur dengan Bantuan <i>Software</i> AutoCAD 2014	54
4.5. Pemodelan Numerik Metode CFD dengan <i>Software</i> ANSYS 14.5	55
4.6. Perhitungan Laju Korosi-Erosi	59
4.7. Perhitungan Moda Kegagalan	63
4.7.1. Penentuan Persamaan Moda Kegagalan	63
4.7.2. Penentuan Variabel Acak dan parameter Statistik Variabel Acak	65
4.7.3. Simulasi Montecarlo	66
4.8. Analisa Konsekuensi dengan Metode Semi-Kuantitatif RBI	70
4.8.1. Analisa Laju Pelepasan Fluida	72
4.8.2. Penentuan Jenis Pelepasan Fluida	72
4.8.3. Penentuan Luas Daerah kebocoran	74
4.8.4. Penentuan Konsekuensi Kegagalan	76
4.9. <i>Likelihood Analysis</i>	77
4.10. Penentuan Tingkat Risiko Semi-Kuantitatif	78
4.11. Perencanaan Inspeksi	80
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	83
5.1. Kesimpulan	83
5.2. Saran	84
DAFTAR PUSTAKA	85

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Distribusi Kecepatan Aliran Fluida pada <i>Elbow Section</i>	2
Gambar 1.2 Jaringan Pipa Milik PT. Pertamina EP Field Sangasanga, Kaltim.....	4
Gambar 1.3 Road Crossing pada Jaringan Pipa PT. Pertamina Sangasanga.....	5
Gambar 2.1 Alur pembebanan pada Inner Wall Pipa Akibat Aliran Fluida.....	15
Gambar 2.2 Pola Aliran laminar.....	16
Gambar 2.3 Bilangan <i>Reynolds</i> dan Pola <i>Secondary flow</i>	17
Gambar 2.4 Pola Aliran Turbulen.....	19
Gambar 2.5 Ilustrasi Tegangan Geser pada Fluida Non-Newtonian.....	19
Gambar 2.6 Orientasi Pengukuran Laju Korosi-Erosi.....	20
Gambar 2.7 Distribusi kecepatan Aliran Fluida pada <i>Elbow section</i>	21
Gambar 2.8 Variasi Kecepatan Aliran Fluida pada <i>Cross-Section Elbow</i>	22
Gambar 2.9 Distribusi Laju Korosi-Erosi Metode <i>Array Electrodes</i>	22
Gambar 2.10 Proses Kimia Terjadinya Korosi Internal Pada Pipa	23
Gambar 2.11 Matriks Risiko Metode Semi-Kuantitatif.....	35
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian.....	44
Gambar 4.1 <i>Elbow</i> Pada Jaringan Pipa PT. Pertamina <i>Field</i> Sangasanga.....	49
Gambar 4.2 Dimensi Utama <i>Elbow Hot Bend Long Radian 45°</i>	54
Gambar 4.3 Model CAD Pipa <i>Road Crossing Section</i> tampak Melintang.....	55
Gambar 4.4 Model CAD Pipa <i>Road Crossing Section</i> tampak Isometrik.....	55
Gambar 4.5 Grafik Hasil <i>Meshing Sensitivity Analysis</i> pada <i>Elbow Section 2</i>	56
Gambar 4.6 <i>Meshing</i> Pada Struktur Pipa <i>Road Crossing</i>	57
Gambar 4.7 Model Inlet Pada <i>Road Crossing Pipeline</i>	58
Gambar 4.8 Model Outlet Pada <i>Road Crossing Pipeline</i>	58
Gambar 4.9 Output Analisa CFD Berupa Kecepatan Pada <i>Elbow Section</i>	59
Gambar 4.10 Hubungan Kecepatan Rerata terhadap kecepatan fluida di <i>Elbow</i>	61
Gambar 4.11 Hubungan Kecepatan Rerata terhadap Laju Korosi-Erosi di <i>Elbow</i>	61
Gambar 4.12 Hubungan Variasi Kecepatan Fluida terhadap Ketebalan <i>Elbow</i> ...	63
Gambar 4.13 Hasil Simulasi Montecarlo pada <i>Elbow 1</i> dengan Variasi RNG....	67

Gambar 4.14 Hasil Simulasi Montecarlo pada <i>Elbow 2</i> dengan Variasi RNG.....	68
Gambar 4.15 Hasil Simulasi Montecarlo pada <i>Elbow 3</i> dengan Variasi RNG.....	68
Gambar 4.16 Hasil Simulasi Montecarlo pada <i>Elbow 4</i> dengan Variasi RNG.....	69
Gambar 4.17 Matriks Risiko untuk Seluruh <i>Elbow Section</i> yang Ditinjau	79
Gambar 4.18 Pengukuran Ketebalan Pelat Menggunakan Metode <i>U.T testing</i>	81

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Ukuran Lubang Kebocoran dan Harga representatifnya.....	29
Tabel 2.2. Jumlah Fluida yang Dapat Terlepas Berdasarkan Jenis Peralatan.....	30
Tabel 2.3. Penentuan Fasa Fluida Setelah Terlepas	33
Tabel 2.4. Syarat-Syarat Minimal Ruang Lingkup Penilaian Internal	40
Tabel 2.5. Metode Inspeksi NDT.....	41
Tabel 4.1. Data Utama <i>Elbow Hot Bend Long Radian 45°</i>	49
Tabel 4.2. Data Tekanan, Kecepatan Rata-Rata Aliran Serta Suhu Operasional....	50
Tabel 4.3. Data Operasional, Properti material Pipa dan Properti Fluida	50
Tabel 4.4. Data Spesifik Properti Fluida.....	51
Tabel 4.5. Data Utama <i>Elbow Hot Bend Long Radian 45°</i>	54
Tabel 4.6. Hasil Meshing Sensitivity Analysis pada Elbow Section 2.....	56
Tabel 4.7. Perhitungan Laju Korosi-Erosi Menggunakan Kecepatan di <i>Elbow</i> ...	60
Tabel 4.8. Ketebalan <i>Elbow Section</i> Masa Operasi Satu Tahun.....	62
Tabel 4.9. Nilai <i>Equivalent Stress</i> Masing-Masing <i>Elbow</i> untuk 20 Pemodelan..	65
Tabel 4.10. Jenis Distribusi dan Parameter Statistik <i>Equivalent Stress Elbow</i>	66
Tabel 4.11. Hasil Simulasi Montecarlo pada <i>Elbow Section 1</i>	67
Tabel 4.12. Hasil Simulasi Montecarlo pada <i>Elbow Section 2</i>	67
Tabel 4.13. Hasil Simulasi Montecarlo pada <i>Elbow Section 3</i>	68
Tabel 4.14. Hasil Simulasi Montecarlo pada <i>Elbow Section 2</i>	69
Tabel 4.15. Properti Fluida	71
Tabel 4.16. Laju Pelepasan Fluida pada Setiap <i>Elbow Section</i> yang Ditinjau.....	72
Tabel 4.17. Jenis Pelepasan Fluida pada <i>Elbow Section 1</i>	73
Tabel 4.18. Jenis Pelepasan Fluida pada <i>Elbow Section 2</i>	73
Tabel 4.19. Jenis Pelepasan Fluida pada <i>Elbow Section 3</i>	73
Tabel 4.20. Jenis Pelepasan Fluida pada <i>Elbow Section 4</i>	73
Tabel 4.21. Persamaan <i>Probability-Weighted Affected Area</i>	74
Tabel 4.22. <i>Probability-Weighted Affected Area</i> Daerah Kerusakan.....	74

Tabel 4.23. <i>Probability-Weighted Affected Area</i> Daerah Berbahaya.....	75
Tabel 4.24. Luas Kombinasi Untuk Kategori Luas daerah Kerusakan.....	75
Tabel 4.25. Luas Kombinasi Untuk Kategori Luas daerah Berbahaya.....	76
Tabel 4.26. Luas Daerah Kebocoran.....	76
Tabel 4.27. Luas Daerah Kebocoran dan Kategori Konsekuensi Setiap <i>Elbow</i> ...	76
Tabel 4.28. Nilai Konstanta Reduksi Ketebalan Material Setiap <i>Elbow Section</i> ..	77
Tabel 4.29. Nilai TMSF untuk Masing-Masing <i>Elbow Section</i>	78
Tabel 4.30. <i>Likelihood Category</i> untuk Masing-Masing <i>Elbow Section</i>	78
Tabel 4.31. Rangkuman <i>Consequence Level</i> dan <i>Likelihood Category</i> semua <i>elbow</i>	79
Tabel 4.32. Integritas Inspeksi pada Peralatan Statis RBI.....	80
Tabel 4.33. Metode Inspeksi, Durasi Inspeksi serta Luas Area Inspeksi Berdasarkan API 581	81
Tabel 4.34. Perencanaan Inspeksi untuk Keempat <i>Elbow Section</i> yang Dievaluasi.....	82

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN A	Output Pemodelan CFD
LAMPIRAN B	Simulasi Montecarlo
LAMPIRAN C	Analisa Konsekuensi

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

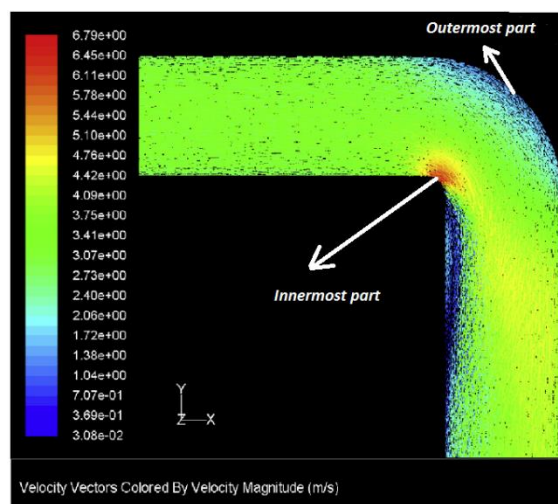
Jaringan pipa memegang peranan penting dalam industri minyak dan gas alam. Sampai saat ini jaringan pipa masih menjadi media penyalur masal paling ekonomis untuk minyak mentah dan gas alam jika dibandingkan dengan kereta api, *truck*, dan kapal *tanker* (Iman dan Kusmono, 2014). Namun demikian, salah satu kelemahan dari jaringan pipa adalah rawan terjadinya korosi internal (*internal corrosion*). Beberapa tahun belakangan ini, penelitian mengenai proses korosi internal pada jaringan pipa menjadi topik yang sangat penting. Hal tersebut dikarenakan dampak ekonomis dan teknis yang ditimbulkannya (Huang dan Ji, 2008). Lebih lanjut, Allahkaram dkk (2015) dalam laporan penelitiannya menyebutkan bahwa *pipeline* sebagai media transportasi minyak, gas dan produk petroleum memegang peranan sangat luar biasa dalam perekonomian suatu negara sehingga upaya perlindungan *pipeline* dari serangan korosi internal sangat vital.

Dalam laporan penelitiannya Shabarchin (2016) mengutip bahwa di British Columbia, Kanada, terdapat sepanjang 40.000 km *pipelines* dalam kondisi beroperasi. Lebih dari 37 kasus kegagalan pada *pipelines* terjadi disana setiap tahunnya menyebabkan tumpahan *liquid* dan terlepasnya gas berbahaya ke udara yang dapat merusak lingkungan maupun properti yang ada disekitarnya. Badan Pengawas minyak dan gas British Columbia (BCOGS) mengindikasi bahwa salah satu penyebab utama terjadinya kegagalan-kegagalan pada *pipelines* tersebut adalah korosi internal. Oleh karenanya, menjadi hal paling penting untuk secara berkala melakukan pengecekan terhadap integritas struktur *pipelines* dari ancaman korosi internal. Pengecekan integritas struktur *pipelines* secara berkala bertujuan untuk mengurangi risiko korosi dan sebagai strategi perawatan *pipelines* sehingga meminimalkan peluang kegagalan.

Seiring dengan peningkatan jumlah bencana pada *pipelines*, maka keamanan dan keselamatan *pipelines* mendapat perhatian lebih diseluruh dunia. Fenomena

erosi yang menimpa bagian dalam dinding perpipaan menjadi salah satu faktor utama penyebab kegagalan pada *pipelines*. Berdasarkan pertimbangan tersebut, Lin dkk (2015) melakukan sebuah penelitian yang menghasilkan sebuah usulan berupa model proses erosi yang merupakan kombinasi dari model teoritis dan fase diskrit Lagrange. Objek penelitian yang digunakan adalah *elbow section* milik Daqing Oil and Gas Company, China. Penelitian tersebut menghasilkan kesimpulan bahwa pada kondisi tekanan tinggi akibat aliran fluida berupa campuran fasa gas dan solid, terjadi erosi pada bagian *elbow section*. Penelitian tersebut juga menghasilkan kesimpulan bahwa kecepatan erosi meningkat seiring dengan peningkatan kecepatan aliran fluida didalamnya.

Untuk mempelajari fenomena korosi-erosi serta kaitannya dengan perilaku aliran fluida didalam *elbow section* berbahan baja karbon, Zhang dkk (2013) melakukan sebuah penelitian dengan menggabungkan dua buah metode yaitu metode *array electrode technique* dan *computational fluid dynamics* (CFD). Dari penelitian tersebut didapatkan kesimpulan bahwa distribusi laju korosi-erosi yang terjadi pada dinding dalam *elbow section* bersesuaian dengan distribusi laju aliran fluida didalamnya. Terdapat kecenderungan dimana laju korosi-erosi dan laju aliran fluida pada bagian *inner wall* lebih tinggi dibanding pada bagian *outer wall*. Laju korosi-erosi dan laju aliran fluida maksimum terjadi pada bagian *innermost* sedangkan laju korosi-erosi dan laju aliran fluida minimum terjadi pada bagian *outermost* dari *elbow section*.



Gambar 1.1 Distribusi kecepatan aliran fluida pada *elbow section* (Zhang dkk, 2013)

Fenomena korosi-erosi adalah salah satu moda kegagalan paling sering terjadi pada *pipelines*. Korosi-erosi bisa menyebabkan degradasi kekuatan struktur *pipelines* penyalur minyak dan gas. Korosi-erosi juga dapat menyebabkan terjadinya kerusakan struktur *pipelines* lebih awal dari umur desainnya. Biaya yang sangat besar tiap tahunnya dikurangkan untuk mengurangi terjadinya korosi-erosi pada *pipelines* (Zeng dkk, 2014). Korosi-erosi internal dapat menyebabkan penipisan dinding dalam perpipaan. Fenomena penipisan dinding dalam ini dapat mengurangi integritas struktur perpipaan yang pada akhirnya dapat menimbulkan kerusakan parah (*catastrophic*) ketika menghadapi kondisi tekanan operasi oleh fluida didalamnya (Khalajestani dkk, 2015).

Seiring dengan semakin maraknya peristiwa kegagalan pada pipa akibat adanya kerusakan yang tanda-tanda awalnya tidak terdeteksi dengan baik, maka perlu adanya peraturan resmi terkait pemeriksaan atau inspeksi pada alat-alat industri minyak dan gas bumi termasuk pada *elbow section*. Peraturan resmi terkait pentingnya pemeriksaan atau inspeksi ini salah satunya tercantum dalam Peraturan Menteri Pertambangan dan Energi No.84.K/38/DJM/1998 tentang '*Pedoman dan Tatacara Pemeriksaan Keselamatan Kerja atas Instalasi, Peralatan dan Teknik yang Dipergunakan Dalam Usaha Pertambangan Minyak dan Gas Bumi dan Pengusahaan Sumberdaya Panas Bumi*'. Secara spesifik, peraturan resmi mengenai pentingnya pemeriksaan atau inspeksi khusus untuk pipa penyalur minyak dan gas bumi tercantum dalam Peraturan Menteri Pertambangan dan Energi Republik Indonesia No.300.K/38/M.PE/1997 tentang '*Keselamatan Kerja Pipa Penyalur Minyak dan Gas Bumi*'.

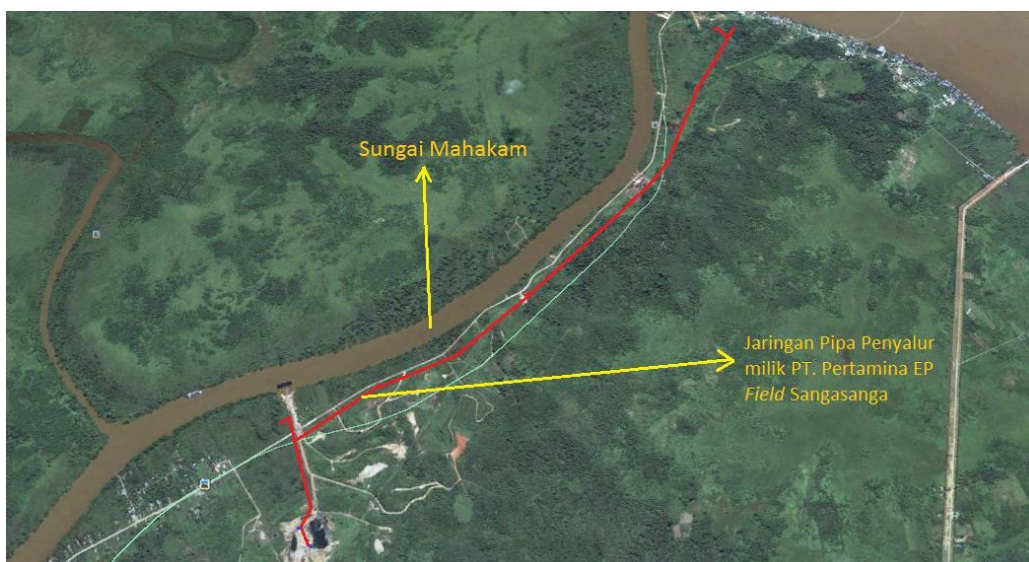
Mengingat pentingnya pelaksanaan inspeksi pada jaringan pipa penyalur minyak dan gas bumi, maka sudah semestinya dilakukan perencanaan program inspeksi berkala. Perencanaan program inspeksi tersebut harus disesuaikan dengan kondisi dari pipa penyalur yang bersangkutan. Pertimbangan faktor tingkat kebutuhan dan faktor ekonomis harus menjadi prioritas utama agar menghasilkan program inspeksi yang efektif dan efisien.

RBI (*Risk Based Inspection*) merupakan metode inspeksi yang paling relevan dan efisien untuk diterapkan saat ini. Metode RBI menggunakan kombinasi dua

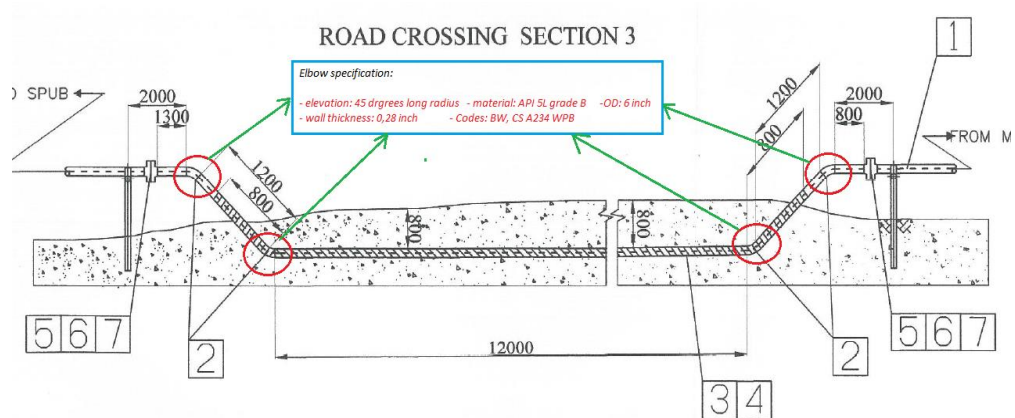
parameter yaitu kemungkinan kegagalan dan konsekuensi kegagalan. Kedua parameter tersebut sangat cocok dijadikan acuan untuk menentukan jenis inspeksi seperti apa yang dibutuhkan oleh suatu peralatan karena terdapat kesesuaian antara tingkat risiko dari struktur itu sendiri dengan metode inspeksi yang akan dipilih.

Taufik (2014) dalam artikelnya menyatakan bahwa saat ini metode RBI sudah dalam fase *mature* dan hampir seluruh perusahaan migas global menggunakan RBI untuk mengelola *integrity assetnya*. Beberapa perusahaan bahkan mengembangkan sendiri metodologi RBI berikut *softwarenya* seperti Shell, Total EP, Chevron, ConocoPhillips, dan sebagainya.

RBI merupakan perwujudan dari metode terkini dalam pendekatan inspeksi terkait penjadwalan inspeksi. Fokus RBI pada peralatan-peralatan perlengkapan dan kegagalan mekanis yang merupakan risiko paling banyak dialami oleh fasilitas-fasilitas produksi (Shishesaz, 2013). Maka dari itu, penelitian ini menggunakan metode RBI untuk menentukan metode inspeksi yang cocok (efektif dan efisien) bagi *elbow section* pada jaringan pipa darat milik PT. Pertamina EP asset 5 Field Sanga-Sanga, Kalimantan Timur



Gambar 1.2 Jaringan pipa penyalur milik PT. Pertamina EP *Field* Sanga-sanga, Kalimantan Timur.



Gambar 1.3 Road crossing elbow section pada jaringan pipa penyalur milik PT. Pertamina EP Field Sangasanga, Kalimantan Timur.

Karena terdapat *elbow section* pada jaringan pipa tersebut, maka sangat rawan terjadi korosi-erosi internal. Oleh karenanya penelitian ini menggunakan jaringan pipa penyalur milik PT. Pertamina EP Field Sangasanga, Kalimantan Timur, sebagai objek penelitian.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas dapat disimpulkan bahwa terdapat beberapa permasalahan yang akan dibahas dalam penelitian ini, yaitu:

1. Bagaimana kondisi pembebanan pada dinding dalam *elbow section* yang terkena korosi-erosi internal akibat aliran fluida berupa hidrokarbon cair?.
2. Bagaimana peluang kegagalan dan konsekuensi yang dapat ditimbulkan serta tingkat risiko dari *elbow section* yang terkena korosi-erosi internal dalam batas yang masih diperbolehkan secara *structural integrity*?.
3. Bagaimana manajemen inspeksi dari *elbow section* yang terkena korosi-erosi internal tersebut jika dikaji menggunakan metode *Risk Based Inspection* (RBI)?.

1.3 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui kondisi pembebanan pada dinding dalam *elbow section* yang terkena korosi-erosi internal akibat aliran fluida berupa hidrokarbon cair.
2. Mengetahui peluang kegagalan dan konsekuensi yang dapat ditimbulkan serta tingkat risiko dari *elbow section* yang terkena korosi-erosi internal dalam batas yang masih diperbolehkan secara *structural integrity*.
3. Mengetahui jenis manajemen inspeksi yang cocok dan sesuai dengan kondisi tingkat risiko *elbow section* yang terkena korosi-erosi internal berdasarkan metode *Risk Based Inspection* (RBI).

1.4 Manfaat

Manfaat utama dari penelitian ini adalah mendapatkan informasi mengenai manajemen inspeksi paling efektif dan efisien yang dapat diterapkan pada *elbow section* milik PT. Pertamina EP *Field* Sangasanga, Kalimantan Timur, yang terkena korosi-erosi internal akibat aliran hidrokarbon cair didalamnya. Pemilihan manajemen inspeksi dilakukan menggunakan metode *Risk Based Inspection* (RBI), sehingga memungkinkan untuk menentukan metode inspeksi, teknologi inspeksi, dan interval inspeksi sesuai dengan tingkat risiko dari *elbow section* yang bersangkutan. Manfaat lain dari penelitian ini adalah dapat memberikan rekomendasi bagi perusahaan pemilik *elbow section* terkait manajemen inspeksi yang efektif dan efisien dalam hal pembiayaan dan waktu pelaksanaan inspeksi.

1.5 Batasan Masalah

Agar permasalahan yang akan dibahas lebih terfokus pada tujuan yang ingin dicapai, maka ditentukan batasan-batasan masalah sebagai berikut:

1. Jenis struktur yang akan dianalisa pada penelitian ini adalah *elbow section* yang merupakan bagian dari jaringan pipa penyalur milik PT. Pertamina EP *Field* Sangasanga, Kalimantan Timur.
2. Dimensi dan properti *elbow section* disesuaikan dengan data pipa penyalur milik PT. Pertamina EP *Field* Sangasanga.

3. Analisa RBI semi-kuantitatif berlaku pada analisa konsekuensi dan penentuan tingkat risiko *elbow section* yang terkena korosi-erosi internal.
4. Analisa peluang kegagalan *elbow section* yang terkena korosi-erosi internal menggunakan persamaan *stress based* dalam DNV OSF 101.
5. Perhitungan nilai peluang kegagalan *elbow section* yang terkena korosi-erosi internal menggunakan metode Simulasi Montecarlo.
6. *Code* yang digunakan adalah API 581 *Risk-Based Inspection Base Resource Documents, First Edition* dan API 580 *First Edition*.
7. Korosi eksternal diabaikan.
8. Jenis aliran fluida pada bagian *pipeline* berkonfigurasi lurus diasumsikan berupa aliran laminar.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika yang akan digunakan dalam penulisan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pendahuluan

Berisikan tentang latar belakang masalah, rumusan masalah, tujuan dan manfaat dari penelitian, batasan masalah serta sistematika penulisan laporan.

2. Tinjauan Pustaka dan Dasar Teori

Berisikan landasan teori yang berhubungan dengan penelitian yang dilakukan oleh penulis. Tinjauan pustaka diambil dari literatur-literatur yang sudah ada, baik dari jurnal, buku teks, internet dan referensi lain yang digunakan sebagai dasar dalam melakukan penelitian.

3. Metodologi Penelitian

Berisikan tentang penjelasan mengenai bagaimana penelitian ini dilakukan mulai dari *start* penelitian, pengumpulan data, pengerjaan analisis, baik analisis struktur maupun analisis fluida, hingga penarikan kesimpulan. Tahapan dalam melakukan penelitian diperlihatkan dalam sebuah diagram alir pengerjaan (*flow chart*).

4. Analisis dan Pembahasan

Berisikan pembahasan mengenai hasil pemodelan *elbow section* beserta mekanisme kerusakan struktur oleh korosi-erosi internal akibat adanya aliran turbulen. Bab ini juga berisikan tentang simulasi Montecarlo untuk mencari nilai peluang kegagalan masing-masing *elbow section* serta analisa konsekuensi kegagalan menggunakan metode semi-kuantitatif RBI. Akhir dari bab ini adalah penentuan tingkat risiko serta penentuan manajemen inspeksi yang sesuai dengan tingkat risiko masing-masing *elbow section*.

5. Kesimpulan dan Saran

Bab ini merupakan bab terakhir. Apabila penelitian telah selesai dianalisis dan dibahas, maka dapat ditarik kesimpulan dari penelitian dengan melihat perumusan masalah dan tujuan dari penelitian ini. Selanjutnya bisa diketahui kekurangan-kekurangan dari penelitian ini yang dapat dijadikan sebagai saran untuk penelitian selanjutnya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Beberapa tahun belakangan ini, penelitian mengenai proses korosi internal pada jaringan pipa menjadi topik yang sangat penting. Hal tersebut dikarenakan dampak ekonomis dan teknis yang ditimbulkannya (Huang dan Ji, 2008). Lebih lanjut, Allahkaram dkk (2015) dalam laporan penelitiannya menyebutkan bahwa *pipeline* sebagai media transportasi minyak, gas dan produk *petroleum* memegang peranan sangat luar biasa dalam perekonomian suatu negara sehingga upaya perlindungan *pipeline* dari serangan korosi internal sangat *vital*.

Iman dan Kusmono (2014) telah menganalisa korosi internal pada jaringan pipa bawah laut milik *CNOOC SES Ltd*. Kesimpulan dari penelitian tersebut adalah bahwa penyebab utama terjadinya korosi internal pada jaringan pipa bawah laut diakibatkan karena adanya *flow induced* dari hidrokarbon dan air pengotornya. Dalam penelitian tersebut, Iman dan Kusmono menggunakan jaringan pipa bawah laut milik *CNOOC SES Ltd*. sebagai objek penelitian. Fokus utama penelitian adalah kebocoran yang terjadi pada bagian horizontal pipeline di dekat *elbow* menuju ke *riser* akibat adanya korosi internal.

Salah satu kelemahan dari penelitian tersebut adalah Iman dan Kusmono hanya melakukan analisa terhadap jaringan pipa yang berkonfigurasi lurus. Sedangkan pada kenyataan di lapangan, jaringan pipa tidak hanya memiliki konfigurasi lurus. Salah satu komponen pada jaringan pipa selain komponen lurus adalah *elbow section*. Perbedaan konfigurasi antara jaringan pipa yang lurus saja dengan jaringan pipa yang memiliki bagian *elbow* mengakibatkan adanya perbedaan perilaku aliran fluida pada masing-masing konfigurasi pipa tersebut.

Dalam laporan penelitiannya Shabarchin (2016) mengutip bahwa di British Columbia, Kanada, terdapat sepanjang 40.000 km *pipelines* dalam kondisi beroperasi. Lebih dari 37 kasus kegagalan pada *pipelines* terjadi disana setiap tahunnya menyebabkan tumpahan *liquid* dan terlepasnya gas berbahaya ke udara

yang dapat merusak lingkungan maupun properti yang ada disekitarnya. Badan Pengawas minyak dan gas British Columbia (BCOGS) mengindikasikan bahwa salah satu penyebab utama terjadinya kegagalan-kegagalan pada *pipelines* tersebut adalah korosi internal. Oleh karenanya, menjadi hal paling penting untuk secara berkala melakukan pengecekan terhadap integritas struktur *pipelines* dari ancaman korosi internal. Pengecekan integritas struktur *pipelines* secara berkala bertujuan untuk mengurangi risiko korosi dan sebagai strategi perawatan *pipelines* sehingga meminimalkan peluang kegagalan.

Seiring dengan peningkatan jumlah bencana pada *pipelines*, maka keamanan dan keselamatan *pipelines* mendapat perhatian lebih diseluruh dunia. Fenomena erosi yang menimpa bagian dalam dinding perpipaan menjadi salah satu faktor utama penyebab kegagalan pada *pipelines*. Berdasarkan pertimbangan tersebut, Lin dkk (2015) melakukan sebuah penelitian yang menghasilkan sebuah usulan berupa model proses erosi yang merupakan kombinasi dari model teoritis dan fase diskrit Lagrange untuk erosi. Objek penelitian yang digunakan adalah *elbow section* milik Daqing Oil and Gas Company, China. Penelitian tersebut menghasilkan kesimpulan bahwa pada kondisi tekanan tinggi akibat aliran fluida berupa campuran fasa gas dan solid, erosi paling parah terjadi pada area dekat dengan *outlet elbow*. Penelitian tersebut juga menghasilkan kesimpulan bahwa kecepatan erosi meningkat seiring dengan peningkatan kecepatan aliran fluida didalamnya.

Harus diakui bahwa fenomena korosi-erosi adalah salah satu moda kegagalan paling sering terjadi pada *pipelines*. Korosi-erosi bisa menyebabkan degradasi kekuatan struktur *pipelines* penyalur minyak dan gas. Korosi-erosi juga dapat menyebabkan terjadinya kerusakan struktur *pipelines* lebih awal dari umur desainnya. Biaya yang sangat besar tiap tahunnya dikucurkan untuk mengurangi terjadinya korosi-erosi pada *pipelines* (Zeng dkk, 2014). Korosi-erosi internal dapat menyebabkan penipisan dinding dalam perpipaan. Fenomena penipisan dinding dalam ini dapat mengurangi integritas struktur perpipaan yang pada akhirnya dapat menimbulkan kerusakan parah (*catastrophic*) ketika menghadapi kondisi tekanan operasi oleh fluida didalamnya (Khalajestani dkk, 2015). Korosi-erosi terjadi akibat

kecepatan aliran fluida yang tinggi dan turbulensi dari fluida. Penyebab tambahan terjadinya korosi-erosi adalah suhu, pH, kuantitas oksigen yang terlarut dalam fluida, dan komposisi dari material (Ryu dkk, 2011).

Khalajestani dkk (2015) dalam jurnal penelitiannya menyatakan bahwa terdapat perbedaan distribusi tekanan pada bagian pipa dengan konfigurasi lurus dengan bagian pipa berbentuk lengkung (*elbow section*). Menurut penelitian tersebut, bagian pipa berbentuk lengkung (*elbow section*) cenderung lebih lemah dalam menahan tekanan internal akibat aliran fluida jika dibanding dengan bagian pipa berkonfigurasi lurus. Pada bagian lurus dari jaringan pipa, aliran fluida hampir mendekati bentuk laminar. Akibat pengaruh dinding pipa, aliran tersebut kemudian berubah menjadi aliran turbulen yang kompleks karena adanya inersia aliran fluida pada bagian lengkungan pipa (*elbow*). Turbulensi ini meningkatkan korosi-erosi pada dinding pipa, dan menjadi penyebab utama dari penipisan dinding pipa. *Elbow section* adalah komponen penting dalam konfigurasi jaringan *pipelines* sebagai media transportasi minyak dan gas. Bagaimanapun juga perubahan arah aliran secara tiba-tiba pada *elbow section* dapat mengakibatkan perubahan luar biasa pada pergerakan dan distribusi partikel solid yang terlarut dalam aliran tersebut, sehingga dapat menyebabkan perbedaan perilaku korosi-erosi pada masing-masing daerah pada *elbow section* (Zeng dkk, 2014).

Ryu dkk (2011) telah melakukan penelitian terkait proses penipisan dinding dalam *elbow section*. Penelitian dilakukan dengan fluida berupa air yang mengalir melewati elbow 90°. Dalam penelitian tersebut, suhu dibuat konstant sebesar 50° C, kecepatan aliran sebesar 5 m/s, dan material yang digunakan adalah baja karbon KSD 3507 dengan P dan S bernilai < 0,04. Pemodelan dilakukan dengan menggunakan ANSYS CFX. Dari penelitian tersebut dihasilkan kesimpulan bahwa tekanan tinggi terjadi akibat inersia dari aliran dengan dinding *elbow*. Karena terjadi perubahan dari aliran laminar pada bagian lurus pipa menjadi aliran turbulen pada bagian *elbow*, mengakibatkan korosi-erosi lebih aktif dibanding pada bagian lurus pipa. Pengaruh tekanan pada *elbow* meningkat seiring dengan meningkatnya kecepatan. Dengan meningkatnya kecepatan aliran, derajat turbulensi pun meningkat, sehingga fenomena korosi-erosi bisa meningkat.

Pada *elbow section* nilai *pressure drop* aliran lebih besar daripada aliran yang mengalir pada saluran lurus dengan panjang yang sama. Hal tersebut dikarenakan aliran yang mengalir pada *elbow* mengalami *friction loss*, *separation loss*, dan *secondary flow*. Bentuk *elbow* yang melengkung mengakibatkan distribusi tekanan didalam *elbow* bervariasi disepanjang *streamline*.

Pada *elbow section* terjadi *friction loss*, separasi aliran, dan *secondary flow*. *Friction loss* terjadi karena adanya gesekan antara fluida dengan *inner surface*. Sementara separasi aliran terjadi karena ketidakmampuan aliran melawan *adverse pressure gradient* sehingga sebagian aliran akan terpisah dan berbalik arah dari aliran utamanya membentuk *vortex* dan mengurangi energi aliran. Sedangkan *secondary flow* terjadi karena perbedaan distribusi energi antara daerah *inner* dan *outer wall* pada *elbow section*. Terbentuknya *vortex* mengakibatkan adanya turbulensi pada aliran. Turbulensi mengakibatkan peningkatan nilai bilangan Reynold, peningkatan bilangan Reynold mengakibatkan peningkatan kecepatan aliran, peningkatan kecepatan aliran mengakibatkan peningkatan nilai tegangan geser, dan akhirnya tegangan geser mengakibatkan korosi internal.

Friction loss terjadi karena adanya gesekan antara fluida dengan *inner surface*. Sementara separasi aliran terjadi karena ketidakmampuan aliran melawan *adverse pressure gradient* sehingga sebagian aliran akan terpisah dan berbalik arah dari aliran utamanya membentuk *vortex* dan mengurangi energi aliran. Sedangkan *secondary flow* terjadi karena perbedaan distribusi energi antara daerah *inner* dan *outer wall* pada *elbow section* (Muslimu, 2012). Adanya *separasi* dan *secondary flow* sangat mempengaruhi timbulnya penurunan tekanan (*pressure drop*) aliran. Secara tidak langsung, terjadinya *pressure drop* dapat menyebabkan terjadinya *headloss*.

Secara umum terdapat dua jenis *headloss*, yaitu *headloss* mayor dan minor. *Headloss* minor adalah kehilangan energi akibat perubahan penampang dan aksesoris lainnya yang salah satunya akibat *elbow section*. *Headloss minor* mengakibatkan adanya tumbukan antara partikel zat cair dan meningkatkan gesekan karena turbulensi serta tidak seragamnya distribusi kecepatan pada suatu penampang pipa. Adanya lapisan batas terpisah dari dinding pipa maka akan terjadi

tolakan pusaran air (*vortex*). Adanya tolakan ini akan mengganggu pola aliran laminar sehingga meningkatkan turbulensi. Turbulensi mengakibatkan tegangan geser, tegangan geser mengakibatkan korosi internal (Negara, 2007).

Seiring dengan semakin maraknya peristiwa kegagalan pada pipa akibat adanya kerusakan yang tanda-tanda awalnya tidak terdeteksi dengan baik, maka perlu adanya peraturan resmi terkait pemeriksaan atau inspeksi pada alat-alat industri minyak dan gas bumi termasuk pada *elbow section*. Peraturan resmi terkait pentingnya pemeriksaan atau inspeksi ini salah satunya tercantum dalam Peraturan Menteri Pertambangan dan Energi No.84.K/38/DJM/1998 tentang '*Pedoman dan Tatacara Pemeriksaan Keselamatan Kerja atas Instalasi, Peralatan dan Teknik yang Dipergunakan Dalam Usaha Pertambangan Minyak dan Gas Bumi dan Pengusahaan Sumberdaya Panas Bumi*'. Secara spesifik, peraturan resmi mengenai pentingnya pemeriksaan atau inspeksi khusus untuk pipa penyalur minyak dan gas bumi tercantum dalam Peraturan Menteri Pertambangan dan Energi Republik Indonesia No.300.K/38/M.PE/1997 tentang '*Keselamatan Kerja Pipa Penyalur Minyak dan Gas Bumi*'.

Mengingat pentingnya pelaksanaan inspeksi pada jaringan pipa penyalur minyak dan gas bumi, maka sudah semestinya dilakukan perencanaan program inspeksi berkala. Perencanaan program inspeksi tersebut harus disesuaikan dengan kondisi dari pipa penyalur yang bersangkutan. Pertimbangan faktor tingkat kebutuhan dan faktor ekonomis harus menjadi prioritas utama agar menghasilkan program inspeksi yang efektif dan efisien.

Taufik (2014) dalam artikelnya menjelaskan tentang sejarah penggunaan metode RBI di dunia. Menurut studi yang dilakukannya RBI mulai dikembangkan tahun 1993 yang dimotori oleh 21 perusahaan migas, petrokimia dan industri proses lainnya. Tujuan dari dikembangkannya metode ini adalah untuk menjawab tantangan *aging facility*. Hasil dari konsesi itu menghasilkan rujukan utama dunia terkait metodologi RBI yakni API 581 (*RBI resources based document*). Dokumen tersebut menampilkan teknologi dan latar belakang perhitungan *scientific* dan *engineering judgement* bagaimana melakukan kajian RBI *step by step*, lengkap dengan *worksheetnya*.

Risk Based Inspection (RBI) adalah pendekatan berbasis risiko untuk menentukan prioritas dan perencanaan inspeksi peralatan-peralatan industri, terutama dalam industri minyak dan gas. Metode inspeksi ini menganalisis kemungkinan terjadinya kegagalan dan kerugian sejenis lainnya sebagai acuan bagi penentuan jenis inspeksi yang akan diterapkan (Zhaoyang dkk, 2011). Konsep perencanaan RBI adalah untuk mengambil kesimpulan-kesimpulan dengan menganggap program penjadwalan inspeksi rutin didasarkan pada kemungkinan kegagalan dan konsekuensi dari kegagalan tersebut. Perhitungan kemungkinan tersebut harus termasuk didalamnya analisis potensi keretakan dan ketidakpastian didalam teknik inspeksi yang sudah direncanakan (Lassen, 2013).

RBI merupakan metode yang paling relevan dan efisien untuk diterapkan saat ini. Metode RBI menggunakan kombinasi dua parameter yaitu kemungkinan kegagalan dan konsekuensi kegagalan. Kedua parameter tersebut sangat cocok dijadikan acuan untuk menentukan jenis inspeksi seperti apa yang dibutuhkan oleh suatu peralatan karena terdapat kesesuaian antara tingkat risiko dari struktur itu sendiri dengan metode inspeksi yang akan dipilih.

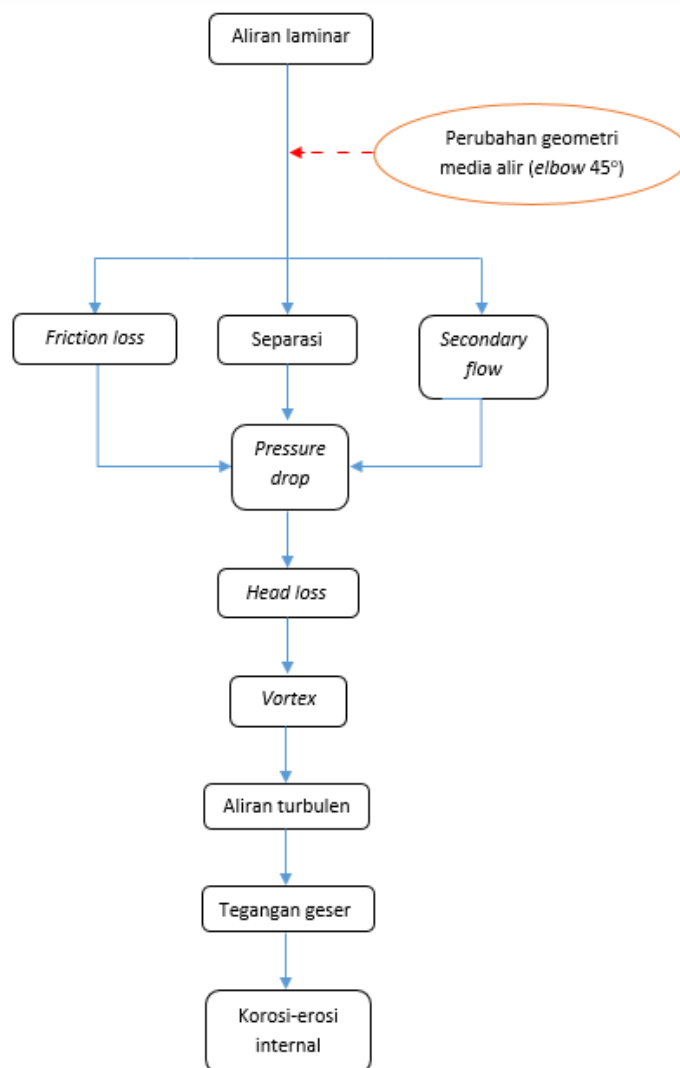
2.2 Dasar Teori

2.2.1 Pembebanan

Berdasarkan tinjauan pustaka yang telah dilakukan oleh peneliti, dapat disimpulkan bahwa pembebanan yang bekerja pada dinding dalam *elbow section* yang ditinjau adalah berupa kecepatan aliran fluida dan tekanan operasional. Karena adanya perubahan konfigurasi secara mendadak pada jaringan perpipaan dari konfigurasi pipa lurus menuju belokan 45° (*elbow section*) maka aliran fluida didalamnya pun mengalami perubahan arah aliran. Karena adanya perubahan arah aliran yang mendadak, maka terjadi anomali aliran.

Anomali aliran paling utama yang terjadi adalah berupa perubahan jenis aliran dari aliran laminar menjadi aliran turbulen. Selain itu, fenomena lain yang terjadi akibat adanya perubahan arah aliran yang mendadak pada *elbow section* 45° ini adalah terjadinya perubahan distribusi tekanan dan distribusi kecepatan

disepanjang sisi dalam *elbow section*, terbentuknya separasi dan *secondari flow*, terjadinya *pressure drop* dan *headloss*, terbentuknya *vortex* dan turbulensi aliran. Hasil akhir dari fenomena aliran berupa *vortex* dan turbulensi yang pada akhirnya menyebabkan terjadinya pembebanan pada dinding dalam *elbow section* ini. Pembebanan ini mengakibatkan terbentuknya tegangan geser yang merupakan penyebab utama terjadinya korosi-erosi internal. Untuk lebih memudahkan dalam memahami pembebanan pada dinding dalam pipa sampai terjadinya korosi-erosi internal, berikut disajikan diagram alir pembebanan pada *inner wall* pipa oleh aliran fluida dalam **gambar 2.1**.

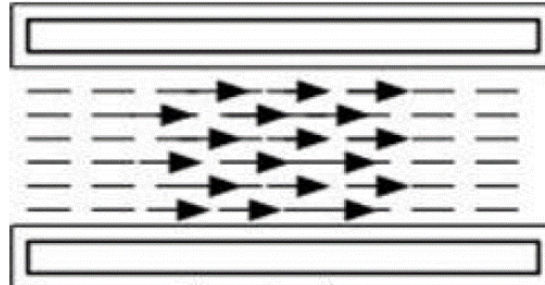


Gambar 2.1 Alur pembebanan pada *inner wall* pipa oleh aliran fluida.

Gambar 2.1 menunjukkan diagram alir proses terjadinya korosi-erosi internal akibat pembebanan pada dinding dalam pipa oleh aliran fluida. Untuk lebih memahami sifat-sifat aliran fluida seperti dalam diagram alir diatas, maka perlu dikaji lebih lanjut masing-masing dari sifat aliran tersebut. Berikut disajikan dasar teori untuk masing-masing sifat aliran tersebut.

2.2.1.1 Aliran Laminar

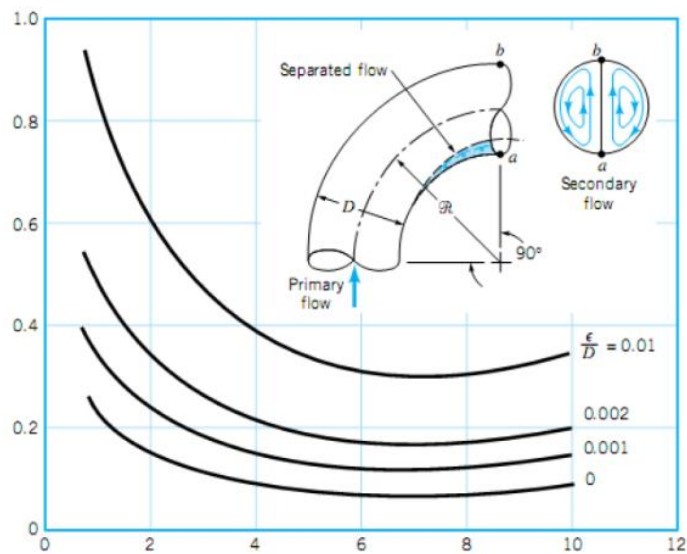
Aliran laminar adalah aliran fluida yang bergerak dalam lapisan-lapisan atau lamina-lamina dengan satu lapis meluncur secara lancar. Dalam aliran laminar ini viskositas berfungsi untuk meredam kecenderungan terjadinya gerakan relatif antar lapisan. Fluida biasanya memasuki pipa dengan profil kecepatan yang hampir seragam. Disaat fluida bergerak melewati pipa, efek viskos menyebabkan fluida menempel pada dinding pipa (kondisi lapisan batas tanpa slip). Hal tersebut berlaku jika fluida adalah udara yang relatif *inviscid* ataupun minyak yang sangat viskos.



Gambar 2.2 Pola aliran laminar (*diglib.unila.ac.id*)

2.2.1.2 Secondary Flow

Secondary flow terjadi karena perbedaan distribusi energi antara daerah *inner wall* dan *outer wall*. Belokan dalam pipa (*elbow section*) menghasilkan *head loss* yang lebih besar daripada pipa yang lurus. *Head loss* disebabkan daerah yang terpisah dari aliran dekat bagian dalam belokan dan aliran sekunder (*secondary flow*) berputar yang terjadi karena adanya ketidakseimbangan gaya sentripetal akibat kelengkungan garis tengah pipa.



Gambar 2.3 Bilangan Reynolds dan pola *secondary flow* (eprints.undip.ac.id)

2.2.1.3 Pressure Drop

Pressure drop yang terjadi pada *elbow section* disebabkan oleh beberapa faktor yaitu *friction loss*, *separasi aliran*, serta *secondary flow*. Kenaikan angka Reynolds memberikan pengaruh yang besar kepada *pressure drop* aliran dalam *elbow section*. Semakin besar angka Reynolds maka kecepatan aliran akan semakin tinggi dan tegangan geser disepanjang dinding *elbow* juga semakin besar. Tegangan geser yang semakin besar menyebabkan *pressure drop* akibat nya *friction loss* juga semakin besar. Kenaikan bilangan Reynolds juga akan memperbesar perbedaan nilai *coefficient pressure* (C_p) antara *inner wall* dan *outer wall* sehingga menimbulkan perbedaan distribusi tekanan yang semakin besar.

2.2.1.4 Head Loss

Adanya kekentalan pada fluida akan menyebabkan terjadinya tegangan geser pada waktu fluida tersebut bergerak. Tegangan geser ini akan merubah sebagian energi aliran menjadi bentuk energi lain seperti panas, suara, dan sebagainya. Pengubahan energi aliran tersebut mengakibatkan terjadinya kehilangan energi (*head loss*). Secara khusus, kehilangan energi aliran yang terjadi pada *elbow section* disebut *head loss minor*. Kehilangan energi sekunder atau *head loss minor* ini akan mengakibatkan adanya tumbukan antara partikel zat cair dan meningkatnya

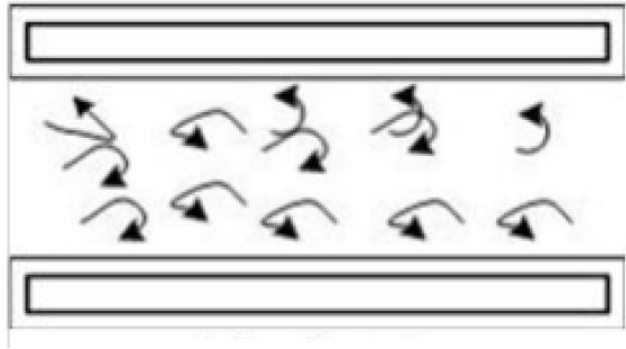
gesekan karena turbulensi serta tidak seragamnya distribusi kecepatan pada suatu penampang pipa. Adanya lapisan batas terpisah dari dinding pipa maka akan terjadi tolakan atau pusaran aliran. Adanya tolakan ini akan mengganggu aliran laminar sehingga akan meningkatkan tingkat turbulensi aliran.

2.2.1.5 Vortex

Bila suatu medan aliran fluida (air atau udara, misalnya) terhalang oleh sebuah benda maka pola aliran fluida tersebut akan terganggu dari kondisi stasionernya lalu akan mencari kondisi kesetimbangan barunya. Misalkan pada kasus sebuah silinder yang berada dalam aliran steady, maka akan terjadilah suatu pola aliran tertentu di sekeliling permukaan silinder tersebut. Berdasarkan banyak percobaan visualisasi aliran yang telah dilakukan, nilai Re (*Reynolds Number*) akan menentukan bagaimana bentuk pola aliran yang akan terjadi. Beberapa diantaranya misalnya, bila nilai $Re < 5$, maka akan terjadi pola aliran yang mulus, tanpa terjadi pusaran-pusaran lokal fluida (*vortex*) dan tidak terjadi pula pemisahan aliran pada saat aliran sudah melewati silinder (*creeping flow*). Selanjutnya bila kecepatan aliran dinaikan, yang berarti nilai Re makin bertambah besar, misalnya untuk rentang $5 < Re < 40$, maka akan memulai bentuk *vortex*. Namun ketika nilai Re ini terus dinaikan, maka medan aliran makin menjadi tidak stabil, yang mana lambat laun formasi *vortex* yang terbentuk mulai berantakan dengan pola-pola yang tertentu. Maka pada saat itulah akan timbul fenomena yang dinamakan pelepasan *vortex* (*Vortex shedding*), yang mulai terjadi pada saat nilai $Re > 40$. Fenomena ini adalah terlepasnya *vortex* secara bolak-balik sisi-sisi silinder dengan pola dan frekuensi tertentu. Pola pelepasan *vortex* ini pun secara lebih detail akan memiliki bentuk tertentu sesuai dengan rentang angka Re -nya.

2.2.1.6 Aliran Turbulen

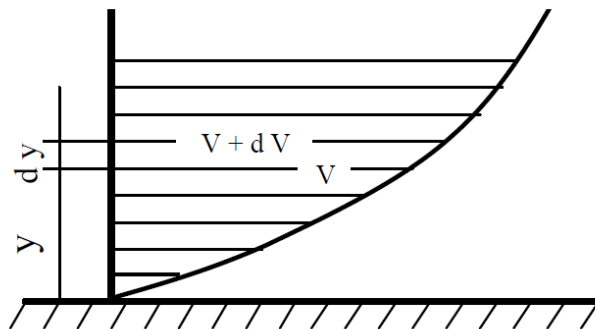
Aliran turbulen adalah aliran fluida dimana pergerakan dari partikel-partikel fluida sangat tidak menentu akibat percampuran serta putaran partikel antar lapisan. Percampuran dan putaran partikel antar lapisan mengakibatkan terjadinya saling tukar momentum dari satu bagian fluida ke bagian fluida yang lain dalam skala besar.



Gambar 2.4 Pola aliran turbulen (diglib.unila.ac.id)

2.2.1.7 Tegangan Geser

Tegangan geser pada suatu titik adalah nilai batas perbandingan gaya geser terhadap luas dengan berkurangnya luas sehingga menjadi titik tersebut. Sedangkan benda padat akan mempertahankan bentuknya sampai dengan gaya yang mengenainya melebihi elastisitas benda tersebut. Fluida yang bergerak (cair maupun gas) disepanjang dinding akan mengalami *shear stress* pada dinding tersebut. Kondisi *non slip* berarti bahwa kecepatan fluida pada dinding pipa (kecepatan relatif) adalah nol, akan tetapi pada jarak tertentu dari dinding, kecepatan fluida akan sama. Area antara dua titik itulah yang disebut dengan lapisan batas (*boundary layer*). Untuk semua fluida Newtonian besarnya *shear stress* proporsional dengan regangan rata-rata pada fluida yang viscositasnya konstan. Akan tetapi untuk fluida non-Newtonian, besarnya tidak akan sama dengan regangan rata-rata dan viskositasnya juga tidak konstan. *Shear stress* yang terjadi pada dinding pipa adalah hasil dari hilangnya kecepatan fluida.

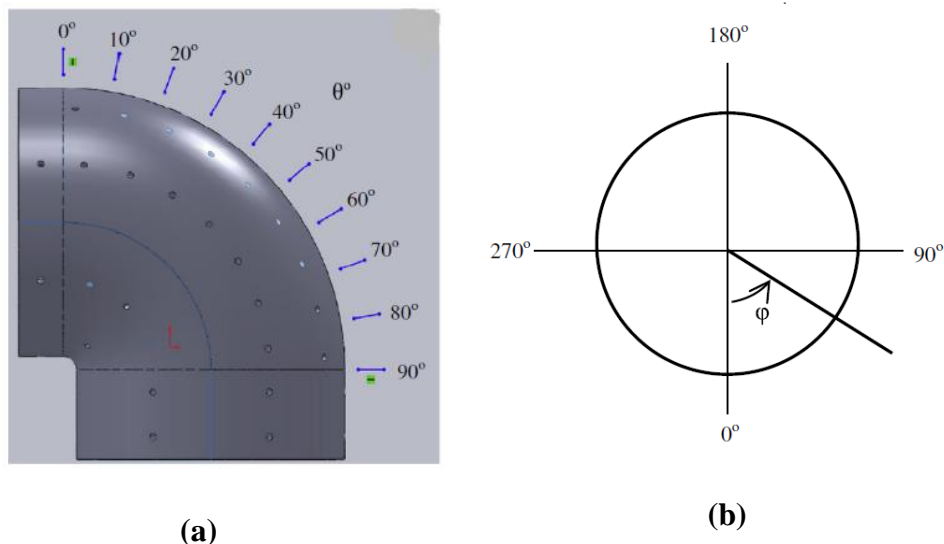


Gambar 2.5 Ilustrasi tegangan geser pada fluida non-Newtonian

Apabila cairan kental mengalir terhadap bidang padat maka terjadi perubahan kecepatan (dalam arah tegak lurus) terhadap arah aliran, hal tersebut disebabkan oleh viskositas dari cairan. Makin dekat lapisan terhadap bidang padat, kecepatan lapisan (v) semakin kecil; Pada $y = 0$, maka $v = 0$. Jadi tiap lapisan bergeser terhadap yang lainnya, sehingga timbul gaya gesek atau gaya geseran. Menurut hipotesa Isaac Newton (1986) yang kemudian dibuktikan oleh N.P. Petrov (1983), tegangan geser (*shear stress*) tergantung pada jenis fluida dan jenis aliran.

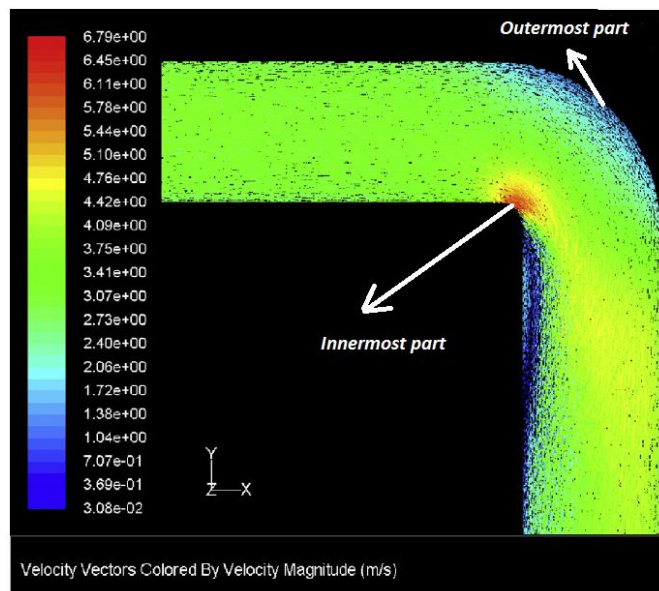
2.2.1.8 Korosi dan Erosi Internl

Zhang dkk (2013) telah melakukan studi tentang perilaku korosi-erosi pada dinding dalam *elbow section* akibat aliran fluida. Dalam Penelitian tersebut mereka menggabungkan metode pengukuran rangkaian elektroda (*array electrode technique*) dengan metode *computational fluid dynamic* (CFD) untuk mengukur laju korosi-erosi serta hubungannya dengan fenomena peningkatan aliran fluida pada dinding dalam *elbow section*. Konfigurasi rangkaian elektroda yang digunakan untuk mengukur laju korosi-erosi dan laju aliran fluida pada dinding dalam *elbow section* yang ditinjau dalam penelitian Zhang dkk ditunjukkan dalam gambar 2.6 dibawah ini:



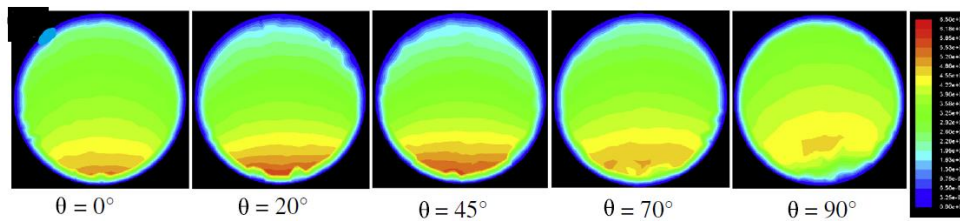
Gambar 2.6 Orientasi pengukuran laju korosi-erosi pada *elbow section* arah (a) longitudinal (b) transversal (Zhang dkk, 2013).

Dari penelitian tersebut didapatkan kesimpulan bahwa distribusi laju korosi-erosi yang terjadi pada dinding dalam *elbow section* bersesuaian dengan distribusi laju aliran fluida didalamnya yang artinya, semakin tinggi laju aliran fluida yang melewati dinding dalam sebuah *elbow section* maka semakin tinggi pula laju korosi-erosi pada dinding dalam *elbow section* tersebut. Terdapat kecenderungan dimana laju korosi-erosi dan laju aliran fluida pada bagian *inner wall* lebih tinggi dibanding pada bagian *outer wall*. Laju korosi-erosi dan laju aliran fluida maksimum terjadi pada bagian *innermost* sedangkan laju korosi-erosi dan laju aliran fluida minimum terjadi pada bagian *outermost* dari *elbow section*.

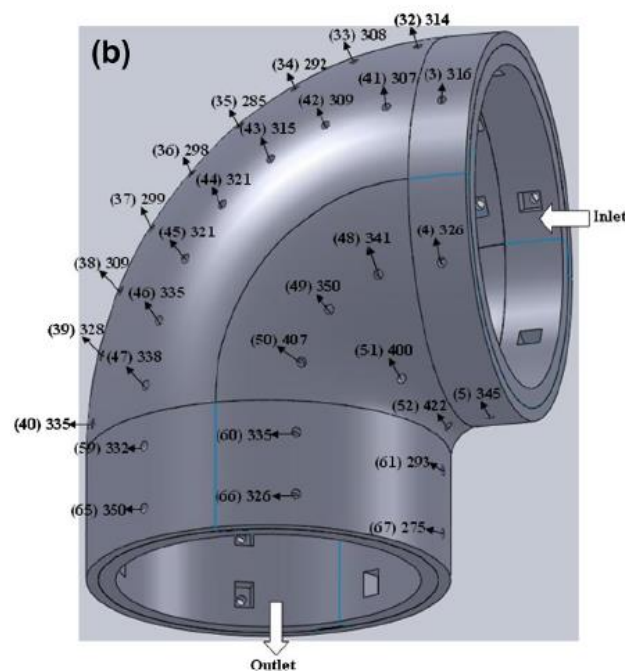


Gambar 2.7 Distribusi kecepatan aliran fluida pada *elbow section* (Zhang dkk, 2013)

Dari penelitian yang dilakukan Zhang (2013) tersebut dapat disimpulkan bahwa laju aliran fluida menurun dari daerah *inner wall* menuju daerah *outer wall* (seiring peningkatan besar sudut ϕ). Pada daerah *outer wall* ($\phi = 116^\circ, 148^\circ, 180^\circ$), laju aliran fluida pada awalnya mengalami penurunan, namun kemudian meningkat sepanjang permukaan *elbow section* sesuai arah aliran fluida (sesuai peningkatan sudut θ). Karakteristik variasi laju korosi-erosi sama dengan karakteristik variasi laju aliran fluida tersebut. Laju korosi-erosi meningkat sepanjang arah aliran fluida (sesuai peningkatan sudut θ).



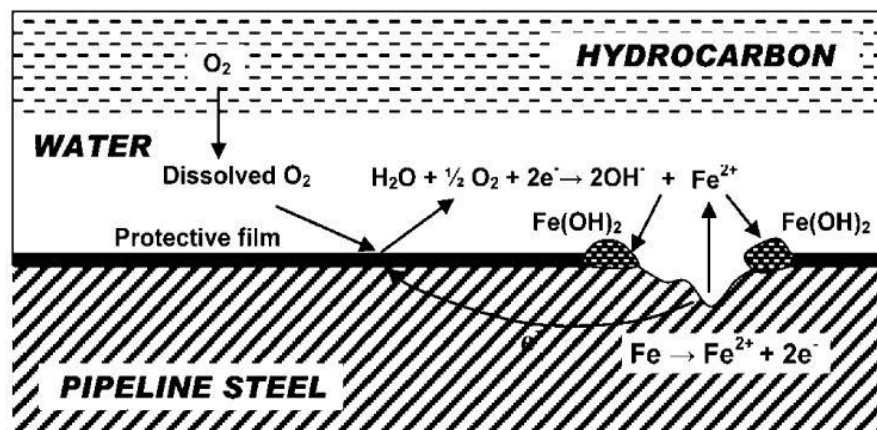
Gambar 2.8 Variasi kecepatan aliran fluida pada *cross-section* disepanjang *elbow section* (Zhang dkk, 2013)



Gambar 2.9 Distribusi laju aliran fluida berdasarkan pengukuran metode rangkaian elektrode (*array electrodes*) pada *elbow section* (Zhang dkk, 2013)

Memperhatikan fakta diatas, maka perlu adanya suatu sistem pemeriksaan (inspeksi) kondisi jaringan pipa sebagai upaya pencegahan terjadinya kegagalan yang tidak diinginkan. Untuk memonitor korosi, baik yang sudah diprediksi akan terjadi ataupun yang diluar prediksi, sebuah program inspeksi yang didasarkan pada *visual and non-destructive test* (NDT) harus dimasukan kedalam perencanaan. Aktivitas inspeksi harus direncanakan secara maksimal untuk menghasilkan keamana, keandalan, produktivitas dan *profitability* yang optimal (Perumal, 2014). Shanbi dan Zhaoxiang (2015) telah melakukan penelitian mengenai korosi internal pada jaringan pipa bawah laut milik *Petro China Southwest Pipeline Company* yang

bertempat di Chengdu, China. Dalam penelitian tersebut menghasilkan beberapa kesimpulan yang salah satunya adalah laju korosi internal pada jaringan pipa bawah laut semakin meningkat seiring dengan meningkatnya CO₂ dan kecepatan aliran fluida. Adapun mekanisme kimia dari korosi dijelaskan dalam **gambar 2.10** dibawah ini.



Gambar 2.10 Proses kimia terjadinya korosi internal pada pipa.

Sebagai akibat dari aliran fluida (*crude oil*) pada dinding dalam pipa, menyebabkan interaksi antara permukaan dinding dalam pipa dengan ion klorida yang terlarut dalam fluida. Selain itu permukaan dinding pipa juga berinteraksi dengan *eddy current* dan juga *entrainment* dari pasir yang ikut terbawa dalam fluida mengakibatkan kerusakan pada lapisan tipis pelindung. Akibat rusaknya lapisan pelindung tersebut, permukaan pipa secara langsung –tanpa penghalang- bereaksi dengan air.

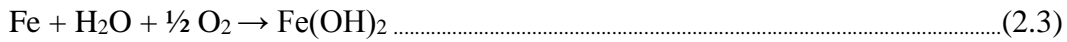
Selanjutnya terjadi reaksi kimia dimana permukaan pipa yang merupakan material baja bertindak sebagai anoda.



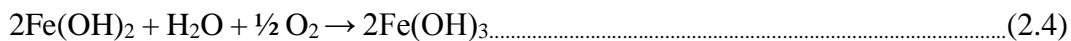
Pada kondisi netral, oksigen terlarut dalam air yang selanjutnya menangkap elektron-elektron dari anode, reaksinya adalah sebagai berikut:



Jika kedua persamaan reaksi kimia (2.1) dan (2.2) digabungkan, maka didapatkan persamaan;



Produk korosi *ferrous hydroxyde* $[\text{Fe}(\text{OH})_2]$ membentuk lapisan penghalang disekitar mulut lubang yang terkorosi. Selanjutnya, lapisan terluar dari $\text{Fe}(\text{OH})_2$ akan bereaksi dengan oksigen yang terlarut dalam fluida membentuk *ferric hydroxyde*, persamaan reaksi kimia tersebut adalah sebagai berikut:



ferric hydroxyde $[\text{Fe}(\text{OH})_3]$ berwarna coklat kemerahan. Perhitungan laju korosi-erosi menggunakan persamaan yang terdapat pada buku *Subsea Pipeline Engineering 2nd Edition* yang disusun oleh Andrew C., Palmer A., dan Roger A., King. Berikut persamaan yang digunakan dalam menentukan laju korosi-erosi pada tiap-tiap *elbow section*:

$$CR_{erosion} = \frac{K(0.65W)U^2\beta}{gP(\frac{\pi}{4}D^2)} \cdot L \dots\dots\dots(2.5)$$

dengan,

- $CR_{erosion}$ = erosion corrosion rate, (mm/year)
- K = Rabinowicz wear constant, (untuk *pipelines* baja dengan penyesuaian terhadap tipe *sliding* menggunakan nilai $6,565 \times 10^{-7}$)
- W = kecepatan produksi partikel terlarut (bbl/month); 1 bbl partikel adalah 945 lb
- U = kecepatan aliran fluida, (ft/s)
- β = koefisien sudut tubrukan partikel (untuk *pipelines* 0.75)
- g = konstanta gravitasi ($32,2 \text{ ft/s}^2$)
- P = material penetration hardness, (untuk baja 1.55×10^7 psi)
- D = diameter dalam pipa, (in)
- L = faktor koreksi, (menggunakan nilai 1.36×10^8)

2.2.2 Peluang Kegagalan

2.2.2.1 Moda Kegagalan

Peluang kegagalan *elbow section* yang terkena korosi-erosi diformulasikan sebagai fungsi dari tegangan *equivalent* terhadap tegangan *yield strength* pada *elbow section* yang ditinjau. *Elbow section* dinyatakan mengalami kegagalan jika tegangan *equivalent* melebihi tegangan *yield strength*. Moda kegagalan yang digunakan dalam tugas akhir ini berdasarkan DNV OS F 101 *Submarine Pipeline System* yang diformulasikan sebagai berikut:

$$Pf = P[\sigma_e > \sigma_{ys}] \dots \dots \dots (2.6)$$

dengan,

$$\sigma_e = \text{equivalent stress, (psi)}$$

$$\sigma_{ys} = \text{yield stress, (psi)}$$

$$= 0.9 \text{ SMYS}$$

Untuk mencari *equivalent stress* dapat menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_h^2 + \sigma_l^2} \dots \dots \dots (2.7)$$

dengan,

$$\sigma_h = \text{hoop stress, (psi)}$$

$$\sigma_l = \text{longitudinal stress, (psi)}$$

Nilai *hoop stress* dan *longitudinal stress* dapat dicari menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\sigma_h = (P_i - P_e) \frac{De-t}{2t} \dots \dots \dots (2.8)$$

$$\sigma_l = \frac{2v (P_i.A_i - P_e.A_e)}{A_s} - E\alpha (Tp - Ta) \dots \dots \dots (2.9)$$

dengan,

- P_i = tekanan internal pipa, (psi)
- P_e = Tekanan luar pipa, (psi)
- D_e = diameter luar pipa, (in)
- t = ketebalan dinding pipa, (in)
- ν = nilai *poisson's ratio*, (0,3 for carbon steel)
- A_e = *external area of pipe*, (in²)
- A_i = *internal bore area of pipe*, (in²)
- A_s = *pipe cross section area*, (in²)
- E = *young's modulus*, (3×10^7 psi)
- α = *thermal expansion coefficient*, (typically $7,3 \times 10^{-6}$ for carbon steel)
- T_p = *temperature of pipe wall*, (F)
- T_a = *ambient temperature*, (F)

Sehingga persamaan moda kegagalan menjadi:

$$g(X) = 0.9 \text{ SMYS} - (\sqrt{\sigma_h^2 + \sigma_l^2} - \sigma_h \sigma_l) \dots \dots \dots (2.10)$$

Sistem dinyatakan gagal jika $g(X) < 0$, dinyatakan berhasil jika $g(X) > 0$ dan dinyatakan failure surface jika $g(X) = 0$. Variabel acak dasar terdiri dari variabel fisik yang menggambarkan ketidakpastian dalam beberapa variabel seperti tekanan operasional dan kedalaman korosi.

2.2.2.2 Simulai *Monte Carlo*

Simulasi *Monte Carlo* adalah salah satu metode *risk assesment* kuantitatif yang dapat digunakan untuk berbagai sistem manajemen risiko, terutama dalam tahapan analisis risiko atau evaluasi risiko yang memiliki fenomena variabel acak (*randon number*). Metode ini disebut pula dengan *Monte Carlo Sampling*, yaitu suatu metode statistik iterasi berulang. Unsur pokok yang diperlukan dalam simulasi *Monte Carlo* adalah sebuah *random number generator* (RNG). Hal ini karena secara teknis, prisnsip dasar metode simulasi *Monte Carlo* adalah sampling sistem dengan bantuan RNG, dimana simulasi dilakukan dengan mengambil

beberapa sampel dan perubah acak yang terlibat dalam sistem yang sedang dipelajari. Nilai sampel dan perubah acak dalam simulasi ini dapat diasumsikan atau telah diketahui.

Dengan menggunakan metode ini kita dapat memprediksi *probability of failure* dengan tingkat keakuratan cukup tinggi sesuai dengan *limit state function* yang telah ditentukan sebelumnya, oleh karena banyaknya trial yang dapat dilakukan dengan jumlah iterasi yang tak terhingga. Semakin banyak iterasi yang dilakukan maka *error* yang terjadi akan semakin kecil, akan tetapi waktu yang diperlukan untuk proses simulasi akan semakin lama.

2.2.2.3 Konsekuensi Kegagalan (Analisa Semi-Kuantitatif)

Konsekuensi kegagalan merupakan nilai dampak yang ditimbulkan akibat gagalnya suatu peralatan. Untuk menentukan konsekuensi maka dipilih kriteria kerusakan yang dapat menyebabkan kerusakan *hazardeus*. *Pitting corrosion* merupakan jenis korosi paling berbahaya karena bisa menyebabkan konsekuensi tingkat *hazard* dalam tingkatan risiko korosi pada perpipaan. Oleh karena hal tersebut, maka *pitting corrosion* bisa digunakan sebagai jenis korosi paling bahaya (Seo dkk, 2015). Secara umum, konsekuensi kegagalan bisa dinyatakan berupa jumlah manusia yang menjadi korban, jumlah kerusakan *property*, luasnya area yang terkena tumpahan, *outage time*, *mission delay*, kerugian uang, dan lain-lain. Biasanya konsekuensi dibagi menjadi tiga, yaitu kategori keamanan, ekonomi, dan lingkungan. Didalam RBI terdapat 4 jenis risiko yang didefinisikan, yaitu:

1. Konsekuensi keterbakaran (*flamable consequence*),
2. Konsekuensi racun (*toxic consequence*),
3. Konsekuensi lingkungan (*environmental consequence*),
4. Konsekuensi bisnis (*bussiness consequence*).

Namun demikian, dalam perhitungan RBI semikuantitatif hanya melibatkan konsekuensi keterbakaran dan konsekuensi racun.

Langkah-langkah yang termasuk perhitungan konsekuensi adalah sebagai berikut:

1. Penentuan fluida representatif,
2. Penentuan banyaknya fluida yang dapat terlepas,
3. Penentuan ukuran lubang kebocoran,
4. Perhitungan laju pelepasan fluida (V_{lepas}),
5. Penentuan jenis pelepasan fluida,
6. Perhitungan konsekuensi keterbakaran,
7. Penentuan lamanya kebocoran,
8. Perhitungan konsekuensi racun,
9. Penentuan kategori konsekuensi.

Data masukan yang diperlukan dalam perhitungan konsekuensi merupakan data keadaan operasi peralatan serta sistem isolasi, deteksi dan mitigasi yang dimiliki kilang. Kategori konsekuensi yang dihasilkan dari perhitungan kemungkinan berharga A (dampak kecil) hingga E (dampak besar).

2.2.2.3.1 Menentukan Fluida Representatif dan Sifat-Sifatnya

Pada suatu pabrik proses, sangat sedikit aliran dari fluida kerja yang merupakan fluida mineral murni. Oleh karenanya, dibutuhkan suatu cara untuk menentukan material atau fluida representatif yang nantinya mewakili fluida dalam aliran untuk dipakai kedalam analisis lebih lanjut. Untuk aliran yang berupa campuran dari beberapa senyawa kimia, material atau fluida representatif ditentukan pertama-tama berdasarkan titik didih normal (NBP) dan berat molekulnya (MW), jika tidak bisa maka dapat digunakan berat jenis fluida tersebut. Jika nilai-nilai tersebut tidak diketahui, maka sifat campuran bisa dihitung menggunakan persamaan dari API 581 *Risk Based Inspection* (2000):

$$\text{Property Mix} = \sum x_i * \text{Property} \dots\dots\dots(2.11)$$

dengan,

x_i = fraksi mol komponen

Property = NBP, MW atau berat jenis

Analisis konsekuensi untuk senyawa hidrokarbon berdasarkan berat molekulnya dianggap kurang tepat karena untuk senyawa hidrokarbon yang mempunyai berat molekul yang sama, sifat *disperse* serta kalor pembakarannya akan sama. Hal ini berlaku untuk hidrokarbon berantai alkana lurus dan kurang bisa diterapkan di senyawa hidrokarbon sejenis aromatik.

2.2.2.3.2 Pemilihan Ukuran Lubang Kebocoran

Metode RBI menggunakan definisi yang tetap tentang ukuran lubang kebocoran. Pendekatan seperti ini dilakukan dengan pertimbangan bahwa jika ukuran lubang telah didefinisikan terlebih dahulu dengan ukuran tetap, maka akan dapat diketahui kemampuan reduksi fluida kerja yang ada dalam peralatan yang dianalisis serta dapat menjaga konsistensi untuk analisis lebih lanjut. RBI menggunakan empat ukuran lubang, yaitu kecil, sedang, besar, dan kondisi pecah. Spesifikasi ukuran lubang menurut RBI lebih lanjut dapat dilihat pada tabel 2.1 dibawah ini.

Tabel 2.1 Ukuran lubang kebocoran dan harga representatifnya

No	Ukuran Lubang	Range (in)	Harga Representatif (in)
1	Kecil	0 – ¼	¼
2	Sedang	¼ - 2	1
3	Besar	2 - 6	4
4	Pecah	>6	Sesuai dengan diameter peralatan

Berdasarkan jenis peralatan yang dianalisis, maka keempat ukuran lubang tersebut tidak semuanya dipakai. Ukuran lubang yang dipakai dalam analisis disesuaikan dengan jenis peralatannya. Untuk sistem perpipaan, RBI memakai standar keempat ukuran lubang diatas dengan batasan ukuran lubang kebocoran yang terjadi pada kasus sebenarnya dan diameter pipa itu sendiri.

2.2.2.3.3 Estimasi Jumlah Total Fluida yang Dapat Terlepas

Metode RBI menggunakan acuan batas atas untuk jumlah fluida yang dapat terlepas dari sebuah peralatan yang dianalisis. Pendekatan RBI secara semi-kuantitatif tidak menggunakan model fluida secara hidrolis dan detail untuk

menentukan jumlah terbesar fluida yang dapat terlepas, tetapi menggunakan metode yang lebih sederhana yang secara pasti dapat diperkirakan jumlah fluida terbesar yang dapat terlepas yang dipengaruhi juga oleh susunan peralatan yang tersambung dengan jenis peralatan yang dalam RBI disebut dengan kelompok peralatan (*inventory group*). Prosedur untuk mengestimasi jumlah massa fluida yang dapat keluar adalah nilai terkecil dari:

1. Massa total yang dapat ditampung oleh peralatan yang dianalisis dan ditambah dengan massa fluida yang mengalir selama tiga menit dari kelompok peralatan (*inventory group*).
2. Massa total dari fluida yang terdapat dalam kelompok peralatan (*inventory group*).

Estimasi jumlah terbesar fluida yang terlepas untuk setiap peralatan yang dianalisis berdasarkan beberapa kriteria, yaitu:

1. Jumlah atau jenis peralatan
Jumlah fluida yang dapat terlepas berdasarkan jenis peralatan yang dianalisis dan persentasenya dapat dilihat pada **tabel 2.2** dibawah ini:

Tabel 2.2 Jumlah fluida yang dapat terlepas berdasarkan jenis peralatan

No	Jenis Peralatan	Volume (%)
1	Kolom (fluida cair)	50% dari setiap fluida yang ada
2	<i>Tray Coloumn</i> , terdiri atas:	
	Bagian atas	50% uap
2	Bagian bawah	50% cairan
3	<i>Knock-out Pots</i> dan Pengering	10% cairan
4	<i>Accumulators</i> dan <i>Drum</i>	50% cairan
5	<i>Separators</i> (pemisah)	50% dari volume tiap fluida yang ada atau fasa yang terjadi
6	Pompa dan kompressor	Diabaikan
7	<i>Heat exchanger</i>	50% dari bagian shell dan 25% dari bagian tube
8	Tungku	50% cairan atau uap dalam <i>tube</i>
9	Sistem Perpipaan	100% total

2. Sistem cair

Untuk analisis berdasarkan sistem cair, peralatan yang dianalisis dikelompokkan berdasarkan keamanan konsekuensi yang ditanggung,

contohnya: bagian bawah dari kolom kolom distilasi dan pipa penghubung, atau tangki penyimpan dan pipa keluaran dan sebagainya.

3. Sistem uap

Untuk analisis berdasarkan sistem uap, beberapa peralatan yang biasanya dikelompokkan dalam sistem uap termasuk:

- Bagian atas dari kolom distilasi, bagian atas kondensor, serta pipa yang menghubungkannya.
- Lubang ventilasi dan saluran keluar

4. Sistem dua fasa

Untuk sistem dua fasa pada umumnya diasumsikan jenis fluida yang keluar adalah kebocoran kontinyu merupakan tipe kebocoran yang fluida cair dan kebocoran yang terjadi biasanya pada bagian bawah dari peralatan yang dianalisis. Dapat juga menggunakan metoda yang lebih konservatif yaitu jika peralatan yang dianalisis fluida kerja mayoritasnya adalah cairan, maka ditentukan jumlah dari fluida cair yang dapat terlepas. Sebaliknya, jika fluida kerjanya adalah gas atau uap, maka dapat ditentukan juga jumlah uap atau gas yang dapat terlepas setelah dikurangi porsi dari fluida cairan.

2.2.2.3.4. Estimasi Laju Kebocoran

Dalam metode RBI digunakan dua tipe kebocoran yang terjadi, yaitu:

- a. Kebocoran secara cepat atau seketika
- b. Kebocoran yang lebih lambat atau kontinyu

Kebocoran secara cepat merupakan tipe kebocoran yang terjadi sangat cepat/seketika dimana fluida yang terlepas akan membentuk 'awan' jika fluidanya berupa gas dan akan membentuk genangan jika fluidanya berbentuk cairan. Sementara itu kebocoran secara kontinyu memerlukan waktu lebih lama daripada kebocoran secara cepat, dimana fluida yang terlepas akan berbentuk elips (masih bergantung pada kondisi lingkungan sekitar). Laju kebocoran suatu fluida sangat bergantung pada sifat fisik material atau fluida yang bersangkutan, fasa awal fluida dan kondisi proses yang dialami. Untuk memilih jenis

persamaan yang dipakai dalam menghitung laju kebocoran, dapat dipakai dua parameter utama yaitu fasa fluida kerja saat berada didalam peralatan yang diamati dan fasa keluarnya (sonik atau sub-sonik). Informasi tentang fasa awal fluida kerja dibutuhkan untuk menentukan fasa apa yang akan terbentuk ketika fluida kerja tersebut terlepas ke atmosfer. Untuk sistem dua fasa, beberapa asumsi dapat dipakai untuk menentukan fasa awal dari fluida dua fasa tersebut, tetapi akan lebih baik jika diasumsikan fasa awal dari fluida kerjanya adalah fasa cair. Persamaan dari RBI 581 yang dapat digunakan untuk menentukan laju aliran fluida cair yang terlepas adalah sebagai berikut:

$$Q_l = C_d A \sqrt{2 \rho - \rho \frac{g_c}{144}} \dots\dots\dots(2.12)$$

dengan,

Q_l = Laju keluar fluida cair (lb/s)

C_d = Koefisien keluaran (0,60 – 0,64)

A = Luas penampang lubang kebocoran (in²)

DP = Perbedaan tekanan antara hulu dan atmosfer (psig)

ρ = Berat jenis fluida (lb/ft³)

g_c = Faktor konversi untuk merubah lbf ke lbfm (32,2 lbfm-ft/lbf-s²)

2.2.2.3.5 Menentukan Tipe Kebocoran

Beberapa metode digunakan untuk menghitung efek dari terlepasnya fluida baik secara seketika atau kontinyu. Oleh karena itu penting untuk menentukan tipe pelepasan fluida (seketika atau kontinyu). Kriteria yang dipakai metode RBI mengacu pada catatan kegagalan yang pernah terjadi disebabkan oleh kebakaran dan ledakan. Suatu jenis kebocoran dikatakan termasuk kedalam jenis kebocoran seketika adalah jika fluida kerjanya dapat keluar semuanya dalam waktu yang

cukup singkat (3 menit) atau dalam waktu 3 menit tersebut dapat membebaskan sekitar 10000 lb fluida kerja yang ada dalam peralatan yang dianalisis. Secara sistematis penentuan tipe terlepasnya fluida adalah sebagai berikut:

- a. Semua kebocoran yang lubang kebocorannya termasuk kedalam kriteria bocor kecil atau berukuran $\frac{1}{4}$ in, dikelompokkan kedalam kebocoran dengan tipe kebocoran kontinyu.
- b. Jika kebocoran yang terjadi mengakibatkan terlepasnya fluida sejumlah 10000 lb dalam waktu tiga menit, maka kebocoran yang terjadi dapat dikategorikan kedalam kebocoran seketika.
- c. Semua tipe terlepasnya fluida kerja lambat (memerlukan waktu relatif lama), tergolong kebocoran kontinyu.

2.2.2.3.6 Penentuan Fase Fluida Setelah Terlepas

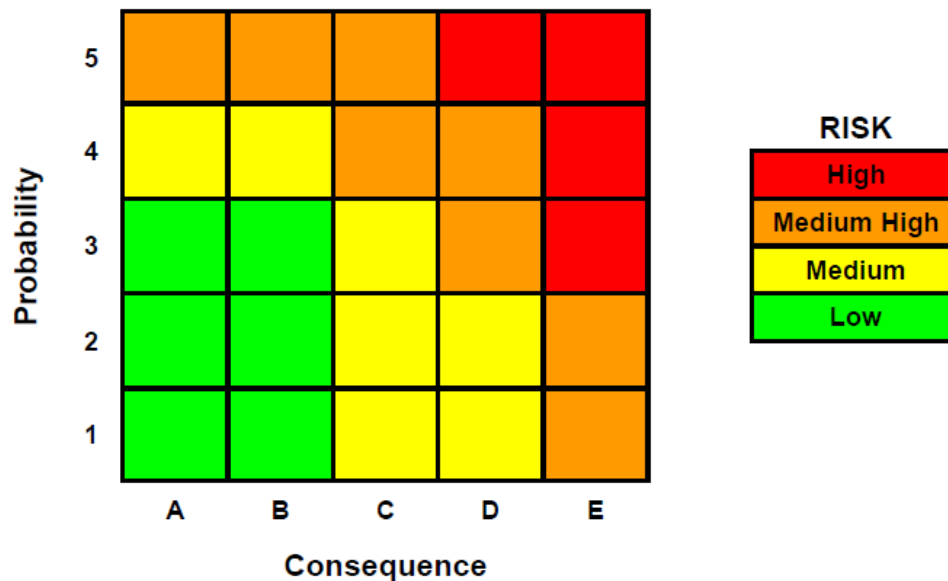
Karakteristik *disperse* dari fluida yang terlepas sangat bergantung pada fasa fluida tersebut jika dilepas ke lingkungan. Jika tidak terjadi perubahan antara fasa setelah terlepas ke lingkungan dengan fasa pada saat kondisi operasi, maka fasa yang dipakai dalam analisis adalah fasa awal fluida tersebut. Untuk lebih memudahkan dalam menentukan fase fluida saat terlepas ke lingkungan, dapat dilihat pada tabel 2.3 berikut:

Tabel 2.3 Penentuan fase fluida setelah terlepas

No	Fase fluida saat kondisi <i>steady state</i> (kondisi operasi)	Fase fluida pada saat kondisi <i>steady state</i> (kondisi lingkungan)	Fase <i>final</i> fluida yang terlepas
1	Gas	Gas	Dimodelkan sebagai gas
2	Gas	Cair	Dimodelkan sebagai gas
3	Gas	Gas	Dimodelkan sebagai gas kecuali titik didih fluida pada kondisi suhu lingkungan diatas 80° F
4	Cair	Cair	Dimodelkan sebagai cair

2.2.3 Risiko Kegagalan

Menurut API 581, analisis perhitungan risiko peralatan dalam konsep RBI menurut standar API 581 dapat dilaksanakan dalam tiga tingkatan analisis. Tingkatan-tingkatan tersebut yaitu analisis kualitatif, analisis semikuantitatif dan analisis kuantitatif. Dalam penelitian ini analisa risiko dilakukan dengan metode semi-kuantitatif. Perhitungan risiko dalam analisis semikuantitatif dilakukan mengikuti buku kerja yang terdapat dalam standar API 581. Langkah-langkah yang dimuat dalam buku kerja berupa isian yang memerlukan data keadaan kilang dan peralatan. Parameter-parameter yang terlibat (dihitung berdasarkan data dan masukan) hingga akhir perhitungan. Data masukan yang diperlukan lebih banyak berupa data kuantitatif. Dibandingkan analisis kualitatif, analisa semikuantitatif berbeda (selain jenis data masukan) dalam hal konsekuensi yang dihitung. Konsekuensi keterbakaran dihitung sebagai konsekuensi kerusakan peralatan (*damage consequence*) dan konsekuensi kematian (*fatality consequence*) yang kemudian dipilih yang terbesar diantara kedua konsekuensi tersebut. Konsekuensi keterbakaran kemudian dibandingkan dengan konsekuensi racun dan yang harganya terbesar menjadi harga konsekuensi. Analisis semikuantitatif merupakan penyederhanaan analisis kuantitatif sehingga mengurangi usaha dan lamanya pengambilan data serta perhitungan risiko. Dalam penelitian ini, konsekuensi kegagalan (CoF) dicari menggunakan analisa semi-kuantitatif RBI 581, sedangkan peluang kegagalan (POF) menggunakan metode Montecarlo. Setelah nilai CoF dan PoF didapatkan, selanjutnya tingkat risiko dinyatakan sebagai hasil kali antara COF dan PoF sehingga risiko dapat dikategorikan melalui matrix 5 x 5 seperti ditunjukkan dalam gambar 2.1 dibawah:



Gambar 2.11 Matriks risiko metode semi-kuantitatif RBI (*sumber: API 581*)

2.2.4 Manajemen Inspeksi

Inspeksi secara umum diartikan sebagai suatu pengujian yang terorganisir atau suatu evaluasi formal yang melibatkan suatu pengukuran dan pengujian yang diterapkan pada karakteristik tertentu yang ditujukan pada objek atau aktifitas. Hasil dari pengujian kemudian dibandingkan dengan standar dan persyaratan tertentu untuk menentukan apakah item atau aktifitas tersebut sesuai dengan target yang disyaratkan.

Hameed dkk (2016) Tujuan utama dari inspeksi dan perawatan adalah untuk memastikan bahwa fasilitas-fasilitas atau peralatan dioptimalkan tidak hanya dengan meningkatkan keandalan dan ketersediaannya dalam sistem tapi juga mengurangi risiko secara keseluruhan. Risiko, keandalan, dan ketersediaan adalah tiga hal yang saling berkesinambungan dan saling berhubungan satu sama lain. Risiko tinggi biasanya menandakan bahwa fasilitas memiliki keandalan dan ketersediaan rendah. Inspeksi biasanya bersifat tidak merusak (*Non-destructive*), *Non-Destructive Examination* (NDE) atau *Non-Destructive Testing* (NDT) atau pengujian tanpa merusak menguraikan sejumlah teknologi yang digunakan untuk

analisa material dari indikasi cacat yang tidak terpisahkan atau kerusakan karena penggunaan. Beberapa metode yang biasanya digunakan adalah *visual*, *liquid or dye penetrant* (PT), *magnetic particle inspection* (MPI), *Radiography*, *Ultrasonic*, *Eddy Current*, *Acoustic Emission* dan *Thermography*. NDT adalah hal penting dalam pembangunan dan pemeliharaan semua jenis komponen dan struktur. Untuk mendeteksi cacat yang berbeda seperti *cracking* dan korosi, ada metode pengujian berbeda yang tersedia, seperti *X-ray* (dimana crack diperlihatkan pada film) dan *ultrasonic* (dimana *crack* ditampilkan dalam bentuk *echo blip* pada layar monitor). Pemeriksaan pada lasan (*weld*) dan besi (*mold*) sangat sulit, suatu objek padat yang memiliki risiko kerusakan pada saat digunakan, sehingga pengujian pada waktu pembuatan dan selama digunakan adalah sangat penting.

Selama masa penggunaan, banyak komponen industri perlu mendapatkan NDT regular untuk mendeteksi kerusakan yang mungkin sulit dan mahal untuk ditemukan dengan setiap metode. Beberapa contoh cakupan pengujian NDT sebagai berikut:

- Pengujian NDT pada jaringan pipa bawah tanah biasanya diutamakan pada korosi dan *stress corrosion cracking*.
- Pengujian NDT pada pipa-pipa perindustrian (pabrik) diutamakan pada erosi dan korosi dari produk yang dialirkan (korosi-erosi internal).
- Pengujian NDT pada bejana tekan untuk *crack* pada lasan.

Secara umum terdapat dua jenis metode inspeksi yang biasanya digunakan, yaitu *Time Based Inspection* dan *Risk Based Inspection* (RBI). Menurut Taufik (2014) banyak fasilitas migas di dunia memasuki masa aging atau penuaan, termasuk di Indonesia, dimana awal eksplorasi dan produksi migas terjadi pada tahun 1970 dan 1980 an, artinya saat ini banyak fasilitas yang sudah beroperasi melewati umur desainnya. Namun demikian karena produksi migas secara ekonomi masih menguntungkan maka operator tidak dapat serta merta menutup atau mengganti fasilitas produksi mereka.

Fasilitas yang sudah tua, terutama peralatan sistem bertekanan seperti *pressure vessels*, *piping* dan *pipeline*, ditandai dengan meningkatnya kerusakan, utamanya korosi, erosi, *wear*, dan kelelahan struktur. Mekanisme kerusakan tersebut yang berjalan untuk waktu yang lama, menyebabkan kegagalan peralatan baik berupa kebocoran (*leak*) atau pecah (*rupture*). Jadi fasilitas yang aging menghadapi masalah integrity dan risiko yang tinggi karena dampak kegagalan peralatan bertekanan bisa berupa *fire and explosion* yang memiliki implikasi terhadap keselamatan manusia, lingkungan, kerugian bisnis serta *asset* yang besar.

Dalam kurun waktu 15 tahun terakhir banyak kegagalan atau kecelakaan di industri migas, petrokimia, dan industri proses, terkait dengan masalah *integrity* seperti ledakan dan kebakaran *refinery* dan *process plants* di USA (2001-2006), *pipeline* (Eropa, USA, Asia). Hampi setiap tahun terjadi kebocoran pipa minyak dan gas yang tidak jarang diikuti oleh ledakan dan kebakaran besar. Berbagai kejadian kecelakaan di industri migas di dunia tersebut memberikan indikasi kuat bahwa mengelola *asset* berbasis waktu sudah tidak memadai, sehingga strategi inspeksi dan *maintenance* sudah harus berubah dari *time base (perspective)* ke *risk based (perspective)*, yakni secara bersamaan mempertimbangkan peluang atau laju kegagalan peralatan dengan konsekuensi kegagalannya baik terkait keselamatan manusia, kerugian bisnis dan *asset*, maupun keselamatan dan kesehatan lingkungan. Oleh karenanya metode RBI masuk menggantikan inspeksi berbasis waktu.

2.2.5 Metode *Risk Based Inspection* (RBI)

Taufik (2014) dalam artikelnya menjelaskan tentang sejarah penggunaan metode RBI di dunia. Menurut studi yang dilakukannya RBI mulai dikembangkan tahun 1993 yang dimotori oleh 21 perusahaan migas, petrokimia dan industri proses lainnya. Tujuan dari dikembangkannya metode ini adalah untuk menjawab tantangan *aging facility*. Hasil dari konsesi itu menghasilkan rujukan utama dunia terkait metodologi RBI yakni API 581 (*RBI resources based document*). Dokumen tersebut menampilkan teknologi dan latar belakan perhitungan *scientific* dan

engineering judgement bagaimana melakukan kajian RBI *step by step*, lengkap dengan *worksheetnya*.

Menurut artikel tersebut, keuntungan yang dapat diambil dari pengaplikasian metode RBI adalah sebagai berikut:

1. Meningkatkan aspek keandalan (*reliability*) dan keselamatan (*safety*) dari peralatan dan fasilitas migas sehingga otomatis menurunkan peluang terjadinya *unplanned shutdown* dan saat bersamaan meningkatkan *availability*.
2. Meningkatkan efektivitas dan efisiensi dalam inspeksi dan pemeliharaan, sehingga terjadi penurunan biaya sampai 25% (*cost effectiveness*).
3. Menambah umur peralatan (*life extension plan*), karena selalu dilakukan identifikasi dan deteksi risiko lebih awal dan penanganan risiko dengan lebih terfokus berdasarkan skala prioritas.
4. Meningkatkan kepercayaan publik dan para pemangku kepentingan terhadap kinerja operator/pemilik karena adanya transparansi dalam pengelolaan risiko dan *assets integrity*.
5. Meningkatkan nilai perusahaan karena telah terujinya kehandalan peralatannya dan dapat menurunkan premi asuransi (*control insurance cost*).

Kajian RBI dimulai dengan mengembangkan metodologi yang meliputi *probability of failure* (PoF), *consequence of failure* (CoF), dan pembuatan *risk matrix*.

Risiko yang didefinisikan sebagai fungsi peluang kegagalan (*probability of failure*) dan fungsi konsekuensi akibat kegagalan (*consequence of failure*) diformasikan sebagai berikut (API RBI 581, 2001):

$$\text{Risk} = \text{CoF} \times \text{PoF} \dots\dots\dots(2.13)$$

dengan: CoF = *consequence of failure*

$$\text{PoF} = \text{probability of failure}$$

Pada kedua fungsi risiko tersebut, perlu dilakukan identifikasi terhadap bobot kontribusi atau peranan masing-masing guna mengetahui batasan dan penilaiannya. Pada umumnya perhitungan dengan RBI dibagi dengan 3 jenis, yaitu kualitatif, semi kuantitatif, dan kuantitatif.

Untuk mewujudkan tujuan tersebut, analisa *corrosion risk* sangat penting dilakukan untuk mengetahui tingkatan kategori *corrosion risk* apakah termasuk kedalam ‘*low risk*’, ‘*mediumrisk*’, ataupun ‘*high risk*’. Oleh sebab itu, dapat dilakukan intensifikasi inspeksi terhadap bagian-bagian yang diprediksi dalam kondisi *high risk* dan *medium risk*. Tahapan-tahapan dalam *Risk Based Inspection* secara umum adalah sebagai berikut:

- a. Mengklasifikasikan secara kualitatif seluruh *operating units*, peralatan, sistem-sistem, perpipaan, dan lain-lain kedalam kategori berisiko rendah, sedang, ataupun tinggi.
- b. Membuat penilaian detail korosi untuk semua item apakah termasuk kedalam risiko menengah atau tinggi dan estimasikan tingkat risiko yang disesuaikan dengan *process parameters*, *variations*, dan konsekuensi jika terjadi kebocoran.
- c. Buat prioritas berdasarkan tingkat risiko masing-masing
- d. Buat desain *Risk Based Inspection* yang cocok untuk memonitor korosi dimana alat-alat yang tergolong berisiko sedang dan tinggi mendapatkan perhatian yang lebih.
- e. Buat sistem monitoring aktivitas *Risk Based Inspection*.
- f. Modifikasi *database* berdasarkan penemuan dari inspeksi dan ulangi proses untuk mengurangi risiko kegagalan.

Terdapat begitu banyak metode inspeksi yang dapat diterapkan untuk tujuan tersebut, tentu saja dengan kelebihan dan kekurangan masing-masing. Namun,

berdasarkan banyak bukti penelitian, metode inspeksi yang paling efektif dan efisien adalah metode RBI (*Risk Based Inspection*).

Dengan dilakukannya analisa risiko ini maka akan didapatkan kesimpulan mengenai metode inspeksi seperti apa yang efektif dan efisien sesuai dengan tingkat risiko dari *elbow section* tersebut. Diharapkan dengan adanya inspeksi ini maka akan mengurangi risiko kerugian akibat kegagalan pada pipeline akibat korosi internal.

2.2.6 Pengembangan Rencana Inspeksi

Menurut Solihin (2003), proses RBI memberikan tiga tingkat kebebasan dalam mengembangkan rencana inspeksi, yaitu:

- *Rating* kekritisian, dalam kombinasi dengan indeks keyakinan digunakan untuk menentukan interval mayoritas inspeksi;
- Konsekuensi kegagalan digunakan untuk menurunkan ruang lingkup inspeksi;
- Peluang terjadinya kegagalan mengidentifikasi mekanisme kegagalan yang diharapkan dan dipakai untuk pengujian dengan menggunakan metode NDT.

Tabel 2.4 Syarat-syarat minimal ruang lingkup terbatas, umum dan detail pada penilaian internal

No	Konsekuensi Kegagalan Rendah-Penilaian Terbatas	Konsekuensi Kegagalan Menengah-Penilaian Umum	Konsekuensi Kegagalan Tinggi-Penilaian Umum
1	Borescope	Borescope dan NDT eksternal	NDT eksternal dan pemantauan korosi dan review proses
2	NDT eksternal	Entry internal	<i>Entry</i> internal
3	Review proses	Review proses dan NDT eksternal	-

2.2.6.1 Penentuan Metode Inspeksi

Pilihan atas metode inspeksi NDT didasarkan atas peluang kegagalan. Tabel 2.5 dibawah ini digunakan sebagai petunjuk. Seleksi terakhir atas metode yang harus dibuat pada saat inspeksi direncanakan atas aspek teknologi yang tersedia dengan aspek pilihan ekonomis.

Tabel 2.5 Metode inspeksi NDT

No	Jenis Kerusakan	Mekanisme Perusakan	Metode Inspeksi
1	Penipisan dinding dalam	Korosi internal	<i>Ultrasonic, Radiography</i>
		Erosi	
		Kavitasi	
		Korosi pengelasan	
2	Penipisan dinding luar	Korosi eksternal	Inspeksi visual, <i>Radiography, Thermography</i>
		Korosi dibawah isolasi	
3	Retak (<i>Cracking</i>)	Kelelahan (<i>fatigue</i>)	<i>Ultrasonic, Radiography, Magnetic particle liquid penetrant</i>
		Retak akibat korosi tegangan (SCC)	
		Retak akibat hidrogen (<i>Wet hydrogen cracking</i>)	
4	Lain-lain	<i>Creep</i>	<i>Ultrasonic, Radiography, Magnetic particle inspection (MPI)</i>
		Pengelasan suhu tinggi (<i>Hot hydrogen damage</i>)	

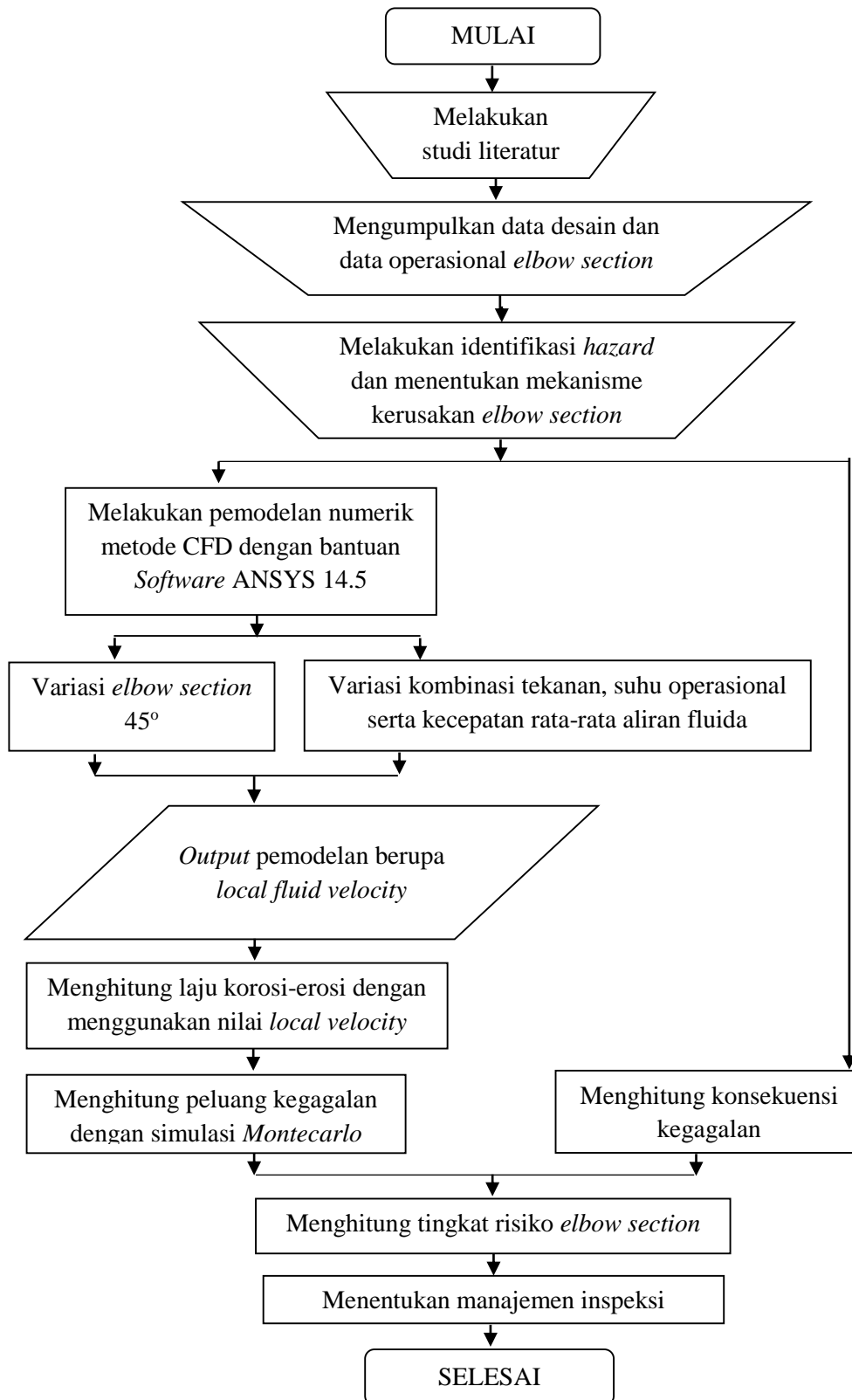
(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan menggunakan metode *Risk based inspection* (RBI). Metode ini banyak digunakan dalam sebuah proyek untuk menganalisa tingkat risiko yang dimiliki masing-masing peralatan untuk selanjutnya dilakukan inspeksi yang disesuaikan dengan tingkat risiko masing-masing peralatan tersebut. Proses penelitian diawali dengan menentukan jenis peralatan yang akan diinspeksi yaitu berupa *elbow section* pada jaringan pipa penyalur milik PT Pertamina EP *Field* Sangasanga, Kalimantan Timur. Selanjutnya melakukan studi literatur yang bertujuan mencari informasi terkait penelitian sejenis yang sudah dilakukan yang nantinya akan dijadikan sebagai referensi dalam penelitian ini. Selanjutnya adalah melakukan pengumpulan data desain *elbow section* dan data operasional *elbow section*. Langkah selanjutnya adalah melakukan identifikasi *hazard* dan menentukan mekanisme kerusakan *elbow section* akibat korosi-erosi internal. Langkah selanjutnya adalah melakukan pemodelan numerik dengan menggunakan bantuan *software* ANSYS FLUID FLOW CFX untuk mendapatkan *local velocity*. Setelah data *local velocity* didapatkan, maka selanjutnya nilai *local velocity* digunakan untuk menghitung nilai laju korosi-erosi. Setelah itu menghitung indeks keandalan dengan simulasi Montecarlo. Selanjutnya menghitung konsekuensi kegagalan dan menghitung tingkat risiko dari masing-masing *elbow* yang ditinjau. Setelah diketahui tingkat risiko dari masing-masing *elbow section* maka selanjutnya dapat menentukan manajemen inspeksi yang sesuai dengan tingkat risiko masing-masing *elbow section* dengan metode semi-kuantitatif RBI. Terakhir adalah melakukan penarikan kesimpulan. Keseluruhan langkah-langkah dalam penelitian ini disajikan dalam diagram alir sebagai berikut:



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.2 Prosedur Penelitian

3.2.1 Studi Literatur

Studi literature berupa proses mencari referensi dari berbagai sumber baik dari buku, jurnal ilmiah, internet, dan sebagainya. Literatur-literatur yang digunakan harus merupakan literatur yang berkualitas dan terpercaya agar penelitian ini memiliki kualitas yang bagus.

3.2.2 Pengumpulan Data

Pengumpulan data sekunder dari PT. Marindotech sebagai PJIT yang melakukan inspeksi terhadap *elbow section* pada jaringan pipa darat milik PT. Pertamina EP *Field* Sangasanga, Kalimantan Timur. Data sekunder yang digunakan berupa dimensi *elbow section* dan data tekanan operasional pada jaringan pipa tersebut.

3.2.3 Pemodelan Numerik menggunakan *Software* ANSYS FLUID FLOW CFX

Pemodelan numerik dengan menggunakan bantuan *software* ANSYS FLUID FLOW CFX dilakukan untuk mendapatkan nilai *local velocity*. Nilai *local velocity* digunakan untuk mencari laju korosi-erosi pada masing-masing elbow yang ditinjau.

3.2.4 Perhitungan Laju Korosi-Erosi

Perhitungan laju korosi-erosi menggunakan persamaan yang terdapat pada buku *Subsea Pipeline Engineering 2nd Edition* yang disusun oleh Andrew C., Palmer A., Roger A., dan King. Berikut persamaan yang digunakan dalam menentukan laju korosi-erosi pada tiap-tiap *elbow section*:

$$CR_{erosion} = \frac{K(0.65W)U^2\beta}{gP(\frac{\pi}{4}D^2)} \cdot L \dots\dots\dots(3.1)$$

dengan,

$CR_{erosion}$ = *erosion corrosion rate*, (mm/year)

K = *Rabinowicz wear constant*, (untuk *pipelines* baja dengan penyesuaian terhadap tipe *sliding* menggunakan nilai $6,565 \times 10^{-7}$)

W	= kecepatan produksi partikel terlarut (bbl/month); 1 bbl partikel adalah 945 lb
U	= kecepatan aliran fluida, (ft/s)
β	= koefisien sudut tubrukan partikel (untuk pipelines 0.75)
g	= konstanta gravitasi (32,2 ft/s ²)
P	= <i>material penetration hardness</i> , (untuk baja 1.55 x 10 ⁵ psi)
D	= diameter dalam pipa, (in)
L	= faktor koreksi, (menggunakan nilai 1.36 x 10 ⁸)

3.2.5 Menghitung Peluang Kegagalan

Perhitungan peluang kegagalan dimulai dengan melakukan penentuan moda kegagalan yang berlaku pada system. Selanjutnya adalah menentukan variabel acak dan mencari parameter statiknya. Perhitungan peluang kegagalan menggunakan metode Montecarlo. Rumus moda kegagalan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

$$g(X) = 0.9 \text{ SMYS} - (\sqrt{\sigma_h^2 + \sigma_l^2} - \sigma_h \sigma_l) \dots \dots \dots (3.2)$$

dengan,

σ_h = *hoop stress*, (psi)

σ_l = *longitudinal stress*, (psi)

3.2.6 Analisa Konsekuensi dengan Metode Semi-Kuantitatif RBI

Tahapan dalam analisa konsekuensi dengan metode semi-kuantitatif RBI adalah sebagai berikut:

- Menentukan jenis fluida representatif
- Menghitung laju terlepasnya fluida.
- Menentukan jenis pelepasan fluida
- Menghitung luas daerah kebocoran.
- Menentukan kategori konsekuensi berdasarkan luas daerah kebocoran.

- f. Membuat matrik risiko.
- g. Merencanakan inspeksi yang sesuai dengan tingkat risiko dari masing-masing *elbow section*.

3.2.7 Kesimpulan

Tahapan ini menyimpulkan mengenai peluang kegagalan pada *elbow section* yang terkorosi, tingkat risiko pada *elbow section* setelah dikaji menggunakan metod RBI, serta metode pemeriksaan/inspeksi yang sesuai dengan kondisi tingkat risiko dari masing-masing *elbow section* yang dimiliki oleh PT. Pertamina EP *Field* Sangasanga.

3.2.8 Menyusun Laporan

Penyusunan laporan dilakukan secara sistematis agar segala rekam jejak analisa proses menggunakan metode RBI ini dapat disampaikan sebagai rekomendasi pemilihan proses inspeksi yang efektif dan efisien.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Utama

Data utama yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data operasional dan desain basis dari pipa penyalur minyak mentah milik PT. Pertamina EP Field Sangasanga, Kalimantan Timur. Data tersebut disajikan dalam **tabel 4.1** sampai **tabel 4.4** sebagai berikut:



Gambar 4.1 *Elbow section* pada jaringan pipa penyalur milik PT. Pertamina EP Field Sangasanga, Kalimantan Timur (Sumber: PT.Marindotech).

Tabel 4.1 Data utama *elbow hot bend long radian 45°*

No	Bagian Struktur	Material	Diameter luar, OD (in)	Diameter Dalam, ID (in)	Ketebalan, T (in)	Elevasi (°)	Kelengkungan, B (in)
1	Elbow 1	Elbow Hot Bend 5D Long Radian	6	5,72	0,28	45	3,808
2	Elbow 2	Elbow Hot Bend 5D Long Radian	6	5,72	0,28	45	3,808
3	Elbow 3	Elbow Hot Bend 5D Long Radian	6	5,72	0,28	45	3,808
4	Elbow 4	Elbow Hot Bend 5D Long Radian	6	5,72	0,28	45	3,808

(Sumber: PT. Marindotech)

Tabel 4.2 Data tekanan operasional, kecepatan rata-rata aliran serta suhu operasional fluida

No	Kondisi	Tekanan operasional (psi)	Kecepatan rata-rata aliran fluida (ft/s)	Suhu operasional fluida (°F)
1	A	2400	3,21	110,00
2	B	2420	3,34	113,68
3	C	2478	3,76	114,99
4	D	2512	4,88	115,77
5	E	2580	5,73	116,19
6	F	2686	7,33	124,22
7	G	2734	8,20	127,11
8	H	2809	9,01	127,76
9	I	2856	9,34	131,09
10	J	2901	9,56	131,73
11	K	2955	9,97	133,39
12	L	3025	10,45	133,52
13	M	3114	10,98	135,75
14	N	3236	11,49	139,14
15	O	3321	11,83	141,46
16	P	3375	12,55	143,86
17	Q	3420	13,79	144,15
18	R	3445	14,24	145,22
19	S	3468	14,63	146,28
20	T	3500	14,85	150,00

(Sumber: PT. Marindotech)

Tabel 4.3 Data operasional, properti material pipa dan properti fluida

No	Kelompok Data	Jenis Data	Keterangan
1	Data Operasional	Tipe fluida	<i>Well fluid</i> (campuran minyak mentah dan air)
2		Kapasitas produksi	30.000 BFPD
3		Temperatur operasi rata-rata	130 °F
4	Properti Material	Jenis Material	API 5L Grade B
5		Diameter pipa (OD)	6 inch NPS sch. 40
6		<i>Density (ρ)</i>	490 lb/ft ³
7		<i>Young modulus (E)</i>	3 x 10 ⁷ psi
8		<i>Poisson's ratio (μ)</i>	0,3
9		<i>Material penetration hardness</i>	1,55 x 10 ⁵ psi
10		<i>Thermal expansion coefficient (α)</i>	7,3 x 10 ⁻⁶
11		<i>Specified minimum yield strength (SMYS)</i>	35.000 psi
12	Properti Fluida	<i>Specific gravity (SG)</i>	0,7981
13		<i>Water content</i>	0,10 % volume
14		Kandungan partikel pengotor	0,20 % volume
15		<i>Salt Content as NaCl</i>	5 Lbs/1.000 bbl
16		<i>Sulphur content</i>	0,04 % weight

(Sumber: PT. Marindotech)

Tabel 4.4 Data spesifik properti fluida

No	Properti Fluida	Nilai	Satuan
1	Berat molekul	280	gram/mol
2	Berat jenis	49,83	lb/ft ³
3	Jenis rantai hidrokarbon	C17 - C25	
4	Tingkat keadaan	<i>Liquid</i>	
5	Temperatur <i>autoignition</i>	396	°F
6	<i>Normal Boiling Point</i> (NBP)	651	°F

(Sumber: PT. Marindotech)

4.2 Identifikasi Bahaya (*Hazard Identification*)

Lekukan pipa atau biasa disebut *elbow section* memiliki potensi kerusakan akibat fenomena korosi-erosi internal lebih besar daripada bagian lurus pipa. Hal tersebut disebabkan karena pada *elbow section*, aliran fluida didalamnya mengalami percepatan (Zhang dkk, 2013) akibat adanya perubahan arah aliran fluida secara mendadak yang akhirnya mengakibatkan turbulensi aliran. Berdasarkan penelitian para ahli diketahui bahwa semakin tinggi kecepatan aliran fluida yang melewati dinding dalam sebuah pipa, maka semakin tinggi pula laju korosi-erosi internal pada pipa tersebut. Korosi-erosi dapat menyebabkan penipisan pada dinding dalam pipa (khususnya pada *elbow section*) sehingga pada akhirnya dapat mengakibatkan bencana ledakan pipa saat beroperasi. Ledakan pipa tersebut disebabkan karena semakin tinggi laju korosi-erosi pada dinding dalam sebuah pipa, maka semakin tinggi pula laju penipisan dinding pipa tersebut sehingga pada suatu ketika dinding/ketebalan pipa tidak lagi mampu menahan tekanan dari dalam pipa (tekanan operasional fluida) dan akhirnya pipa meledak.

Allahkaram dkk (2015) dalam laporan penelitiannya menyebutkan bahwa *pipeline* sebagai media transportasi minyak, gas dan produk petroleum memegang peranan sangat luar biasa dalam perekonomian suatu negara sehingga upaya perlindungan *pipeline* dari serangan korosi-erosi internal sangat vital. Salah satu upaya perlindungan *pipeline* dari bahaya kerusakan akibat adanya korosi-erosi internal adalah dengan melakukan inspeksi secara berkala terhadap jaringan pipa tersebut. Hameed dkk (2016) menyatakan bahwa tujuan utama dari inspeksi dan

perawatan adalah untuk memastikan bahwa fasilitas-fasilitas atau peralatan dioptimalkan tidak hanya dengan meningkatkan keandalan dan ketersediaannya dalam sistem tapi juga mengurangi risiko secara keseluruhan.

Terdapat beberapa jenis manajemen inspeksi yang dapat diterapkan terhadap peralatan-peralatan industri, namun para ahli semakin merekomendasikan metode *Risk Based Inspection* (RBI) sebagai metode manajemen inspeksi yang paling relevan untuk diterapkan saat ini. Metode RBI menggunakan kombinasi dua parameter yaitu kemungkinan kegagalan dan konsekuensi kegagalan. Kedua parameter tersebut sangat cocok dijadikan acuan untuk menentukan jenis inspeksi seperti apa yang dibutuhkan oleh suatu peralatan karena terdapat kesesuaian antara tingkat risiko dari struktur itu sendiri dengan metode inspeksi yang akan dipilih. Taufik (2014) dalam artikelnya menyatakan bahwa saat ini metode RBI sudah dalam fase *mature* dan hampir seluruh perusahaan migas global menggunakan RBI untuk mengelola *integrity assetnya*. Beberapa perusahaan bahkan mengembangkan sendiri metodologi RBI berikut *software*nya seperti Shell, Total EP, Chevron, ConocoPhillips, dan sebagainya.

4.3 Skenario

Skenario diperlukan untuk mempermudah dalam mencapai tujuan dari penelitian ini. Penelitian ini menggunakan serangkaian proses kerja, baik yang dilakukan secara berurutan maupun yang dilakukan secara paralel (bersamaan). Fokus utama dari penelitian ini adalah pemodelan proses korosi-erosi pada dinding dalam *elbow section* yang disebabkan oleh aliran hidrokarbon cair didalamnya. Fokus lain dari penelitian ini adalah menentukan nilai peluang kegagalan (PoF) pada masing-masing *elbow section* yang ditinjau dengan menggunakan metode simulasi Montecarlo. Berikut penjelasan singkat mengenai skenario dari kedua fokus penelitian diatas:

4.3.1 Pemodelan Proses Korosi-Erosi Internal

Pemodelan proses korosi-erosi dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut:

- a. Membuat model geometri struktur *road crossing pipeline* yang terdapat *elbow section* padanya. Model geometri dilakukan dengan bantuan *software* AutoCAD 3D.
- b. Melakukan analisa laju aliran fluida pada *elbow section* menggunakan metode *computational fluid dynamics* (CFD). Pemodelan dilakukan sebanyak 20 buah dengan masing-masing pemodelan melibatkan satu variasi kombinasi input data berupa laju aliran fluida rata-rata, tekanan operasional serta suhu operasional. Dari pemodelan ini didapatkan *output* berupa 20 buah nilai kecepatan aliran fluida pada *elbow section* untuk masing-masing *elbow* yang ditinjau, sehingga data kecepatan fluida pada *elbow section* yang didapat adalah sebanyak 80 buah dengan masing-masing *elbow section* (*elbow section* 1-4) sebanyak 20 buah data. Peneliti memilih melakukan pemodelan sebanyak 20 buah dengan tujuan untuk mendapatkan data yang cukup akurat dan representatif.
- c. Menghitung nilai laju korosi-erosi internal dengan menggunakan rumus Andrew dkk dalam buku *Subsea Pipeline Engineering*. Peneliti memilih persamaan tersebut karena mampu merepresentasikan kasus yang diteliti. Dalam rumus tersebut melibatkan variabel kecepatan aliran fluida dan banyaknya kandungan partikel pengotor dalam hidrokarbon. Kedua variable tersebut merupakan penyebab utama terjadinya korosi-erosi pada dinding dalam *elbow section*, sehingga sangat cocok untuk digunakan sebagai persamaan yang representatif.

4.3.2 Menghitung Nilai PoF dengan Simulasi Montecarlo

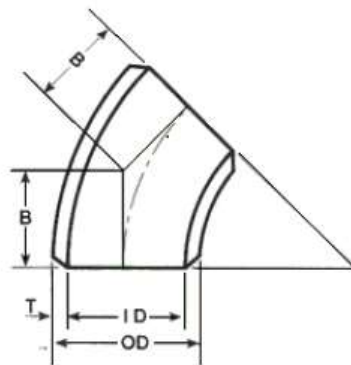
Nilai PoF didapatkan dengan mengikuti langkah-langkah sebagai berikut:

- a. Menentukan moda kegagalan struktur *elbow section*. Moda kegagalan yang digunakan mengikuti persamaan yang terdapat dalam DNV OS F101 tentang *Submarine Pipeline System*. Dalam persamaan tersebut melibatkan variabel bebas *equivalent stress* dan variabel kontrol berupa nilai SMYS dari struktur *elbow section*. Variabel bebas tersebut didapatkan dengan melibatkan nilai *hoop stress* dan *longitudinal stress*.

- b. Melakukan simulasi Montecarlo untuk masing-masing *elbow section*. Simulasi dilakukan secara berulang-ulang untuk setiap *elbow section* dengan jumlah *Random Number Generator* (RNG) bervariasi. Variasi jumlah RNG bertambah untuk setiap simulasi, dengan jumlah penambahan sebanyak 1000 RNG. Tujuan dari simulasi yang berulang-ulang dengan jumlah RNG terus bertambah adalah sebagai validasi untuk mendapatkan nilai PoF yang konstan dan mampu merepresentasikan kondisi sesungguhnya.

4.4 Pemodelan Struktur dengan Batuan *Software* AutoCAD 2014

Pemodelan struktur dengan menggunakan *software* AutoCAD 3D dilakukan untuk mendapatkan input awal dalam analisa numerik menggunakan *software* ANSYS 14.5. Data yang dibutuhkan dalam pemodelan menggunakan *software* AutoCAD adalah berupa dimensi struktur sebagai berikut:



Gambar 4.2 Dimensi utama *elbow hot bend long radius 45°* (www.alibaba.com)

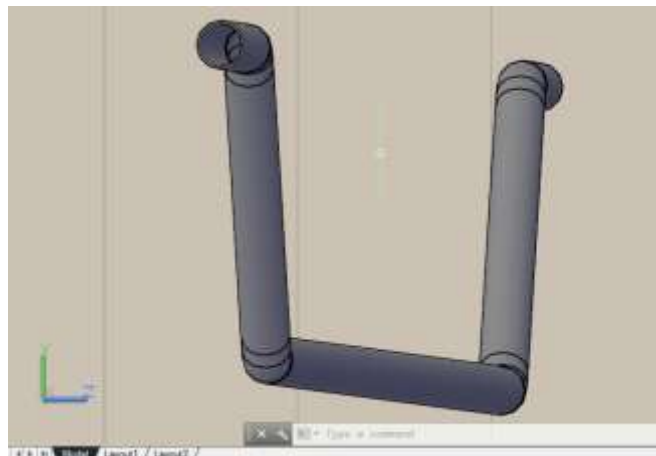
Tabel 4.5 Data utama *elbow hot bend long radius 45°*

No	Bagian Struktur	Material	Diameter luar, OD (in)	Diameter Dalam, ID (in)	Ketebalan, T (in)	Elevasi	Kelengkungan, B (in)
1	Elbow 1	Elbow Hot Bend 5D Long Radian	6	5,72	0,28	45	3,808
2	Elbow 2	Elbow Hot Bend 5D Long Radian	6	5,72	0,28	45	3,808
3	Elbow 3	Elbow Hot Bend 5D Long Radian	6	5,72	0,28	45	3,808
4	Elbow 4	Elbow Hot Bend 5D Long Radian	6	5,72	0,28	45	3,808

Berikut hasil pemodelan AutoCAD 3D untuk struktur yang ditinjau:



Gambar 4.3 Model CAD struktur pipa *road crossing section* tampak melintang



Gambar 4.4 Model CAD struktur pipa *road crossing section* tampak isometrik

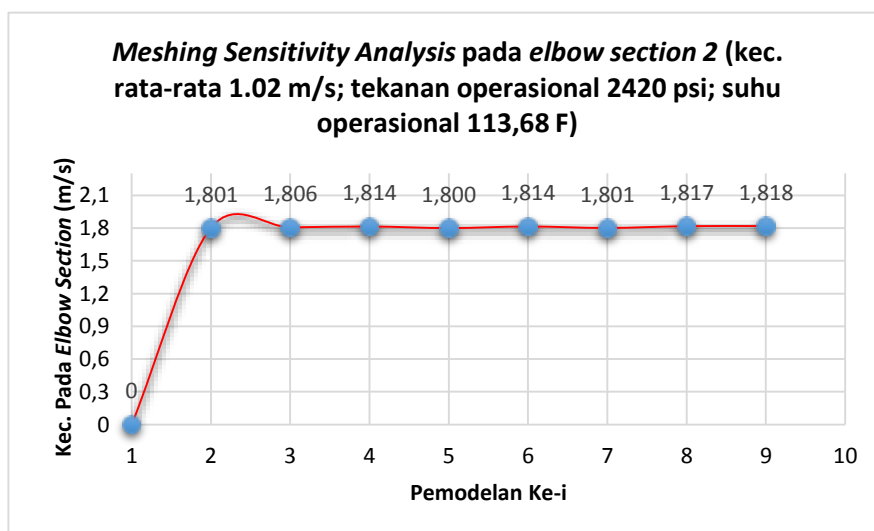
4.5 Pemodelan Numerik Metode CFD dengan *Software* ANSYS 14.5

Pemodelan numerik dengan menggunakan bantuan *software* ANSYS ICEM CFD dilakukan untuk mendapatkan nilai kecepatan relatif fluida pada masing-masing *elbow section*. Langkah pertama dalam pemodelan ini adalah menentukan ukuran *meshing* yang optimal sehingga hasil dari pemodelan mampu merepresentasikan kondisi sesungguhnya. Penentuan *meshing* yang optimal ini dapat dilakukan dengan *meshing sensitivity analysis*. Secara sederhana *meshing sensitivity analysis* dapat dijelaskan sebagai serangkaian pemodelan yang dilakukan terhadap sebuah objek yang sama dengan melibatkan berbagai variabel input terkait. Keseluruhan variabel input dalam pemodelan-pemodelan tersebut dibuat

konstan, kecuali variabel *meshing* yang sengaja dibuat berubah-ubah untuk mendapatkan kesimpulan mengenai ukuran *meshing* mana yang menghasilkan *output* yang konstan. Pada saat *output* yang dihasilkan sudah mencapai angka konstan, maka ukuran *meshing* tersebutlah yang mampu menghasilkan *output* yang representatif dan ukuran *mesing* tersebutlah yang akan digunakan untuk keseluruhan pemodelan CFD pada penelitian ini. Dalam penelitian ini menggunakan *elbow section 2* sebagai objek dalam *meshing sensitivity analysis* dengan tiga inputan utama berupa input kecepatan pada *inlet* sebesar 3.34 ft/s atau 1.02 m/s, inputan pada *outlet* berupa tekanan operasional sebesar 2420 psi dan inputan pada domain berupa suhu operasional sebesar 113.68 °F. Berikut hasil *meshing sensitivity analysis* yang dilakukan terhadap *elbow section 2*.

Tabel 4.6 Hasil *meshing sensitivity analysis* pada *elbow section 2*

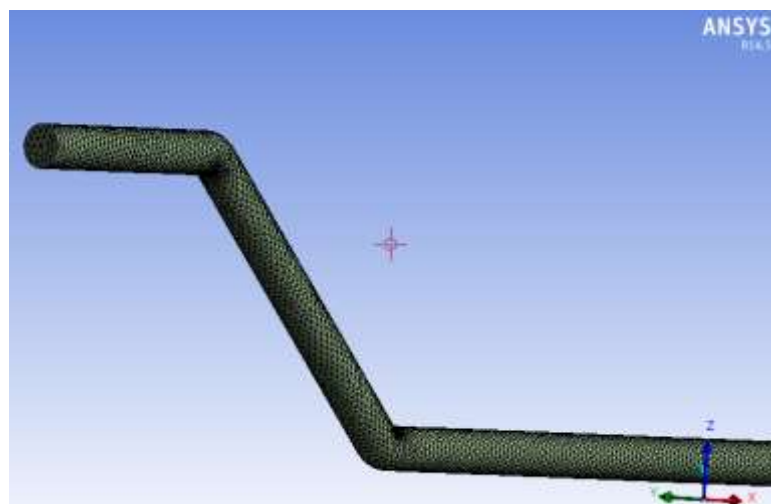
No	Ukuran Meshing (m)	Kecepatan pada <i>Elbow section</i> (m/s)
1	0,82	1,801
2	0,09	1,806
3	0,08	1,814
4	0,07	1,800
5	0,06	1,814
6	0,05	1,801
7	0,04	1,817
8	0,03	1,818



Gambar 4.5 Grafik hasil *meshing sensitivity analysis* pada *elbow section 2*

Dari tabel dan grafik *meshing sensitivity analysis* diatas dapat disimpulkan bahwa nilai *output* berupa kecepatan aliran fluida di *elbow section 2* mencapai angka konstan pada ukuran *meshing* sebesar 0,04 m dengan nilai kecepatan sebesar 1,17 m/s. Hal tersebut menandakan bahwa pada ukuran *meshing* 0,04 m sudah mampu menghasilkan model yang representatif dengan kondisi sesungguhnya. Oleh karena hal tersebut, keseluruhan pemodelan numerik CFD pada penelitian ini menggunakan ukuran *meshing* 0,04 m sebagai salah satu variabel input.

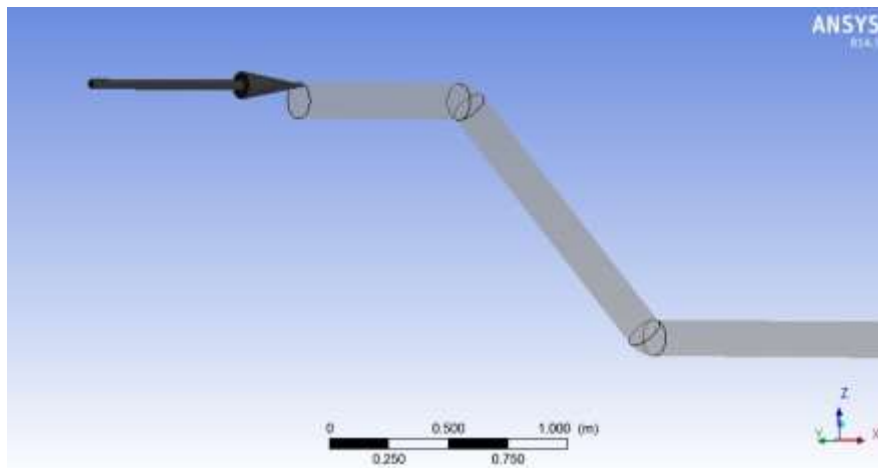
Setelah didapatkan ukuran *meshing* yang akan digunakan, maka selanjutnya adalah melakukan pemodelan CFD untuk seluruh kondisi variasi. Langkah-langkah dalam pemodelan tersebut sebagaimana langkah-langkah dalam membuat model pada *meshing sensitivity analysis* adalah model CAD struktur yang sudah dibuat selanjutnya di-*import* kedalam software ANSYS ICEM CFX. Setelah model di-*import*, selanjutnya adalah melakukan *editing* pada geometri. *Editing* dilakukan untuk memberikan nama pada bagian-bagian struktur, yaitu: *elbow 1*, *elbow 2*, *elbow 3*, *elbow 4*, *inlet*, dan *outlet*. Selanjutnya adalah memberikan *meshing* terhadap struktur dengan ukuran *meshing* sebesar 0,04 m. Pada **gambar 4.6** berikut ditunjukkan contoh hasil *meshing* pada struktur yang ditinjau:



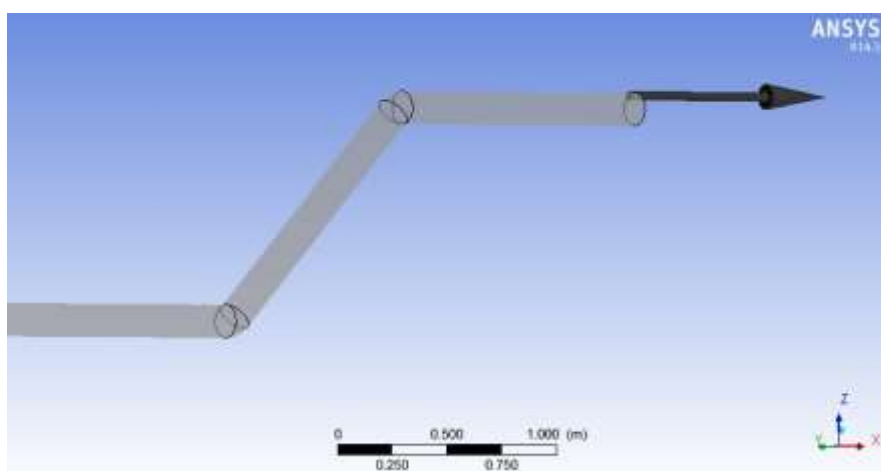
Gambar 4.6 *Meshing* pada struktur pipa *road crossing*

Langkah selanjutnya adalah memberikan *boundary condition* pada ANSYS CFX-Pre. Langkah ini bertujuan untuk memberikan batasan yang jelas terhadap analisa

yang dilakukan. Input berupa data properti fluida (massa molar, *density* dll) dibuat konstan, sedangkan input berupa data kecepatan fluida, tekanan operasional, serta suhu operasional dibuat sebanyak 20 pasang variasi. Input kecepatan fluida, tekanan operasional serta suhu operasional dibuat sebanyak 20 buah variasi dengan rentang masing-masing variabel input yaitu rentang kecepatan 3 sampai 15 ft/s, rentang tekanan operasional 2400 sampai 3500 psi, dan rentang suhu operasional 110 sampai 150 °F. Data kecepatan rata-rata fluida digunakan sebagai input pada *inlet* sedangkan data tekanan operasional digunakan sebagai input pada *outlet* model pada *software* ANSYS ICEM CFD. Hasil pemberian *boundary condition* pada struktur dapat dilihat dalam **gambar 4.7** dan **4.8** berikut:

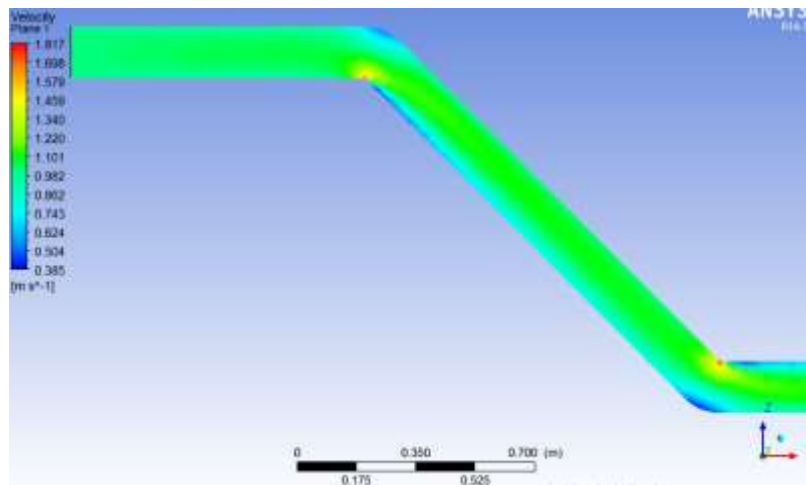


Gambar 4.7 Model *inlet* pada *road crossing pipeline*



Gambar 4.8 Model *outlet* pada *road crossing pipeline*

Setelah melakukan *running* pada ANSYS CFX-Pre, selanjutnya adalah melakukan analisa pada ANSYS CFX-Post untuk mendapatkan *output* yang dibutuhkan dalam langkah selanjutnya. Dengan membuat *plane* maka kita dapat menganalisis pola aliran fluida pada *elbow section* yang ditinjau. Dari analisa yang dilakukan maka didapatkan nilai kecepatan fluida yang dibutuhkan untuk mencari nilai laju korosi-erosi. Berikut disajikan contoh *output* berupa kecepatan fluida pada *elbow section* dengan input kecepatan rata-rata sebesar 3.34 ft/s, tekanan operasional 2420 psi dan suhu operasional sebesar 113,68 °F:



Gambar 4.9 *Output* analisa CFD berupa Kecepatan pada *elbow section*

Hasil running CFX-Post untuk keseluruhan variasi input kecepatan rata-rata dapat dilihat pada LAMPIRAN A .

4.6 Perhitungan Laju Korosi-Erosi

Perhitungan laju korosi-erosi menggunakan persamaan yang terdapat pada buku *Subsea Pipeline Engineering 2nd Edition* yang disusun oleh Andrew C., Palmer A., dan Roger A. King. Berikut persamaan yang digunakan dalam menentukan laju korosi-erosi pada tiap-tiap *elbow section*:

$$CR_{erosion} = \frac{K(0.65W)U^2\beta}{gP(\frac{\pi}{4}D^2)} \cdot L \dots\dots\dots(4.1)$$

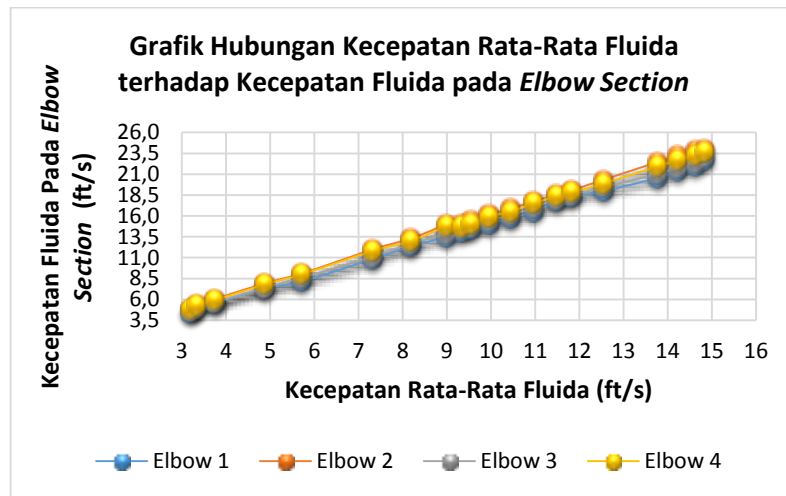
dengan,

$CR_{erosion}$	= <i>erosion corrosion rate</i> , (mm/year)
K	= <i>Rabinowicz wear constant</i> , (untuk <i>pipelines</i> baja dengan penyesuaian terhadap tipe <i>sliding</i> menggunakan nilai $6,565 \times 10^{-7}$)
W	= kecepatan produksi partikel terlarut (bbl/month); 1 bbl partikel adalah 945 lb
U	= kecepatan aliran fluida, (ft/s)
β	= koefisien sudut tubrukan partikel (untuk <i>pipelines</i> 0.75)
g	= konstanta gravitasi ($32,2 \text{ ft/s}^2$)
P	= <i>material penetration hardness</i> , (untuk baja 1.55×10^5 psi)
D	= diameter dalam pipa, (in)
L	= faktor koreksi, (menggunakan nilai 1.36×10^8)

Nilai laju korosi yang didapat dari perhitungan dengan menggunakan persamaan diatas merupakan laju korosi-erosi per-tahun. Berikut disajikan hasil perhitungan laju korosi-erosi pada masing-masing *elbow* yang ditinjau:

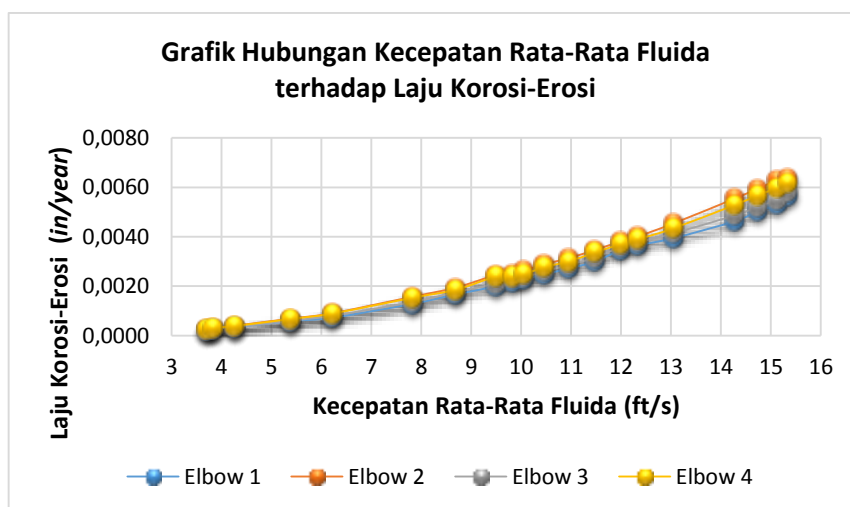
Tabel 4.7 Perhitungan laju korosi-erosi dengan menggunakan kecepatan fluida pada *elbow section*

No	Kecepatan Rata-rata Fluida (ft/s)	Kecepatan Fluida Pada <i>Elbow Section</i> (ft/s)				Laju korosi (in/year)			
		<i>Elbow 1</i>	<i>Elbow 2</i>	<i>Elbow 3</i>	<i>Elbow 4</i>	<i>Elbow 1</i>	<i>elbow 2</i>	<i>elbow 3</i>	<i>elbow 4</i>
1	3,21	4,92	5,32	5,02	5,23	0,00027	0,00031	0,00028	0,00030
2	3,34	5,46	5,96	5,49	5,77	0,00033	0,00038	0,00033	0,00037
3	3,76	6,13	6,62	6,19	6,46	0,00041	0,00048	0,00042	0,00046
4	4,88	8,02	8,67	8,09	8,52	0,00071	0,00082	0,00072	0,00080
5	5,73	8,92	9,96	9,38	9,85	0,00087	0,00109	0,00097	0,00106
6	7,33	11,87	13,11	12,18	12,90	0,00155	0,00189	0,00163	0,00183
7	8,20	13,50	14,56	13,85	14,20	0,00200	0,00233	0,00211	0,00221
8	9,01	14,77	16,35	15,16	16,14	0,00239	0,00294	0,00252	0,00286
9	9,34	15,38	16,50	15,75	16,12	0,00260	0,00299	0,00272	0,00285
10	9,56	15,83	16,94	16,04	16,43	0,00275	0,00315	0,00282	0,00296
11	9,97	16,45	17,73	16,83	17,37	0,00297	0,00345	0,00311	0,00331
12	10,45	17,22	18,48	17,64	18,06	0,00326	0,00375	0,00342	0,00358
13	10,98	18,08	19,43	18,56	19,13	0,00359	0,00414	0,00378	0,00402
14	11,49	19,46	20,38	19,77	20,07	0,00416	0,00456	0,00429	0,00442
15	11,83	19,96	20,90	20,27	20,58	0,00437	0,00479	0,00451	0,00465
16	12,55	20,74	22,24	21,24	21,74	0,00472	0,00543	0,00495	0,00519
17	13,79	22,48	24,59	23,03	24,01	0,00555	0,00664	0,00582	0,00633
18	14,24	23,43	25,44	23,83	24,84	0,00602	0,00711	0,00623	0,00677
19	14,63	24,08	26,15	24,49	25,53	0,00636	0,00750	0,00658	0,00715
20	14,85	24,78	26,31	25,16	25,93	0,00674	0,00760	0,00695	0,00738



Gambar 4.10 Grafik hubungan kecepatan rata-rata fluida terhadap kecepatan fluida pada *Elbow Section*

Gambar 4.10 menunjukkan kecenderungan hubungan antara kecepatan rata-rata fluida terhadap kecepatan fluida pada *elbow section*. Dari gambar tersebut dapat disimpulkan bahwa terdapat perbedaan nilai antara kecepatan rata-rata fluida dengan kecepatan fluida pada *elbow section*. Dapat dilihat bahwa kecepatan fluida pada *elbow section* lebih besar jika dibandingkan dengan kecepatan fluida rata-rata. Hal tersebut disebabkan karena adanya turbulensi aliran pada daerah *elbow* sebagai akibat dari perubahan geometri struktur secara mendadak.



Gambar 4.11 Grafik hubungan kecepatan rata-rata fluida terhadap kecepatan laju korosi-erosi pada *elbow section*

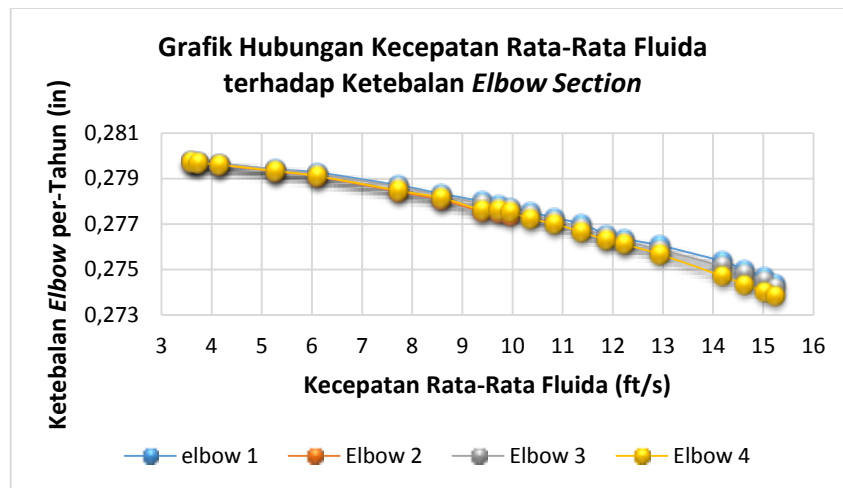
Dari gambar diatas dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi kecepatan aliran fluida pada *elbow section*, maka semakin tinggi pula nilai laju korosi-erosi pada *elbow* yang bersangkutan. Hal tersebut dapat difahami lewat persamaan laju korosi-erosi diatas dimana besarnya nilai kecepatan aliran fluida berbanding lurus dengan laju korosi-erosi. Langkah selanjutnya adalah menghitung ketebalan *elbow section* setelah mengalami korosi-erosi. Berikut disajikan tabel ketebalan tiap-tiap *elbow section* setelah mengalami korosi-erosi selama satu tahun operasi:

Tabel 4.8 Ketebalan *elbow section* masa operasi satu tahun.

No	Kecepatan Rata-rata Fluida (ft/s)	Ketebalan Pipa per-Tahun (in)			
		<i>Elbow 1</i>	<i>Elbow 2</i>	<i>Elbow 3</i>	<i>Elbow 4</i>
1	3,21	0,2797	0,2797	0,2797	0,2797
2	3,34	0,2797	0,2796	0,2797	0,2796
3	3,76	0,2796	0,2795	0,2796	0,2795
4	4,88	0,2793	0,2792	0,2793	0,2792
5	5,73	0,2791	0,2789	0,2790	0,2789
6	7,33	0,2785	0,2781	0,2784	0,2782
7	8,20	0,2780	0,2777	0,2779	0,2778
8	9,01	0,2776	0,2771	0,2775	0,2771
9	9,34	0,2774	0,2770	0,2773	0,2771
10	9,56	0,2773	0,2768	0,2772	0,2770
11	9,97	0,2770	0,2765	0,2769	0,2767
12	10,45	0,2767	0,2763	0,2766	0,2764
13	10,98	0,2764	0,2759	0,2762	0,2760
14	11,49	0,2758	0,2754	0,2757	0,2756
15	11,83	0,2756	0,2752	0,2755	0,2753
16	12,55	0,2753	0,2746	0,2750	0,2748
17	13,79	0,2745	0,2734	0,2742	0,2737
18	14,24	0,2740	0,2729	0,2738	0,2732
19	14,63	0,2736	0,2725	0,2734	0,2728
20	14,85	0,2733	0,2724	0,2731	0,2726

Dapat disimpulkan bahwa keempat *elbow section* cenderung mengalami pengurangan ketebalan dinding dalam akibatkan korosi-erosi yang dipicu oleh kecepatan aliran fluida yang terus meningkat. Untuk mempermudah dalam

memahami hubungan antara variasi kecepatan terhadap ketebalan *elbow section* per-tahun, berikut disajikan grafik hubungan antara keduanya:



Gambar 4.12 Grafik hubungan antara variasi kecepatan rata-rata fluida terhadap ketebalan *elbow section* per-tahun.

4.7 Perhitungan Moda Kegagalan

4.7.1 Penentuan Persamaan Moda Kegagalan

Peluang kegagalan *elbow section* yang terkena korosi-erosi diformulasikan sebagai fungsi dari tegangan *equivalent* terhadap tegangan *yield strength* pada *elbow section* yang ditinjau. *Elbow section* dinyatakan mengalami kegagalan jika tegangan *equivalent* melebihi tegangan *yield strength*. Moda kegagalan yang digunakan dalam tugas akhir ini berdasarkan DNV OS F 101 *Submarine Pipeline System* yang diformulasikan sebagai berikut:

$$P_f = P[\sigma_e > \sigma_{ys}] \dots \dots \dots (4.2)$$

dengan,

σ_e = *equivalent stress*, (psi)

σ_{ys} = *yield strength*, (psi)

$$= 0.9 \text{ SMYS}$$

Untuk mencari *equivalent stress* dapat menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_h^2 + \sigma_l^2} \dots \dots \dots (4.3)$$

dengan,

$$\sigma_h = \text{hoop stress, (psi)}$$

$$\sigma_l = \text{longitudinal stress, (psi)}$$

Nilai *hoop stress* dan *longitudinal stress* dapat dicari menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\sigma_h = (P_i - P_e) \frac{D_e - t}{2t} \dots \dots \dots (4.4)$$

$$\sigma_l = \frac{(P_i A_i - P_e A_e)}{A_s} + E \alpha (T_p - T_a) - \frac{2\nu (P_i A_i - P_e A_e)}{A_s} \dots \dots \dots (4.5)$$

dengan,

Sehingga persamaan moda kegagalan menjadi:

$$P_i = \text{tekanan internal pipa, (psi)}$$

$$P_e = \text{Tekanan luar pipa, (psi)}$$

$$D_e = \text{diameter luar pipa, (in)}$$

$$t = \text{ketebalan dinding pipa, (in)}$$

$$\nu = \text{nilai poisson's ratio, (0,3 for carbon steel)}$$

$$A_e = \text{external area of pipe, (in}^2\text{)}$$

$$A_i = \text{internal bore area of pipe, (in}^2\text{)}$$

$$A_s = \text{pipe cross section area, (in}^2\text{)}$$

$$E = \text{young's modulus, (3 x 10}^7\text{ psi)}$$

$$\alpha = \text{thermal expansion coefficient, (typically 7,3 x 10}^{-6}\text{ for carbon steel)}$$

$$T_p = \text{temperature of pipe wall, (}^\circ\text{F)}$$

$$T_a = \text{ambient temperature, (}^\circ\text{F)}$$

$$g(X) = 0.9 \text{ SMYS} - (\sqrt{\sigma_h^2 + \sigma_l^2} - \sigma_h \sigma_l) \dots \dots \dots (4.6)$$

Sistem dinyatakan gagal jika $g(X) < 0$, dinyatakan berhasil jika $g(X) > 0$ dan dinyatakan *surface failure* jika $g(X) = 0$.

4.7.2 Penentuan Variabel Acak dan Parameter Statistik Variabel Acak

Dari Persamaan moda kegagalan diatas dapat diketahui variabel acak berupa *equivalent stress* (σ_e). Berikut disajikan Tabel variabel acak yang digunakan dalam perhitungan moda kegagalan:

Tabel 4.9 Nilai equivalent stress maing-masing *elbow section* untuk 20 pemodelan

Pemodelan Ke-i	Equivalent Stress, σ_e (psi)			
	Elbow Section 1	elbow Section 2	Elbow Section 3	Elbow Section 4
1	21160,63	21163,65	21161,36	21162,96
2	21307,50	21311,30	21307,77	21310,09
3	21824,27	21828,96	21824,76	21827,35
4	22144,57	22152,82	22145,43	22150,91
5	22762,29	22777,89	22769,04	22776,12
6	23758,50	23783,56	23764,54	23779,19
7	24239,17	24263,60	24247,13	24255,26
8	24931,28	24973,16	24941,19	24967,27
9	25398,03	25428,76	25408,00	25418,09
10	25810,10	25842,00	25815,88	25827,11
11	26321,47	26360,27	26332,50	26349,12
12	26955,32	26996,24	26968,63	26982,27
13	27790,18	27837,76	27806,63	27826,87
14	28953,49	28989,24	28965,24	28977,12
15	29750,56	29788,97	29763,10	29775,94
16	30294,94	30360,68	30316,26	30338,20
17	30767,48	30871,00	30793,63	30841,34
18	31050,33	31153,69	31070,26	31121,71
19	31303,60	31413,55	31324,83	31379,54
20	31700,24	31782,94	31720,45	31761,71

Langkah selanjutnya adalah melakukan pengujian distribusi data dan mencari nilai parameter statistik *equivalent stress* dari masing-masing *elbow section*. Nilai parameter statistik yang didapat selanjutnya akan digunakan untuk mendapatkan nilai *random number generator* (RNG). Nilai RNG inilah yang digunakan dalam simulasi Montecarlo untuk mendapatkan nilai peluang kegagalan (PoF) dari masing-masing *elbow section*. Dalam penelitian ini, nilai parameter statistik didapatkan dengan bantuan *software* Minitab. Berikut ini hasil pengolahan data menggunakan *software* Minitab:

Tabel 4.10 Jenis distribusi dan parameter statistik *equivalent stress* masing-masing *elbow section*

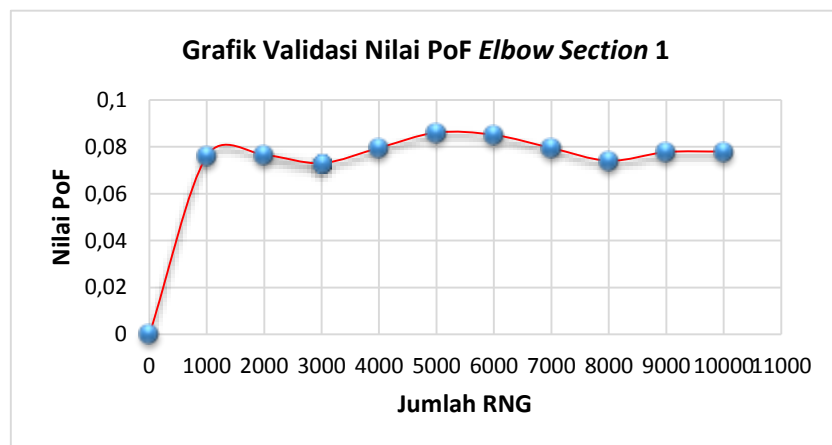
No	Jenis Variabel	Jenis Distribusi Data	Parameter Statistik	
			μ	σ
1	<i>Equivalent stress of elbow section 1 (psi)</i>	Normal	29411	3619
2	<i>Equivalent stress of elbow section 2 (psi)</i>	Normal	26454	3649
3	<i>Equivalent stress of elbow section 3 (psi)</i>	Normal	26422	3626
4	<i>Equivalent stress of elbow section 4 (psi)</i>	Normal	26441	3640

4.7.3 Simulasi Montecarlo

Setelah diketahui parameter statistik dari masing-masing *equivalent stress* seperti ditampilkan dalam tabel 4.9 diatas, maka selanjutnya adalah melakukan simulasi *Montecarlo* dengan menggunakan moda kegagalan yang telah ditentukan (persamaan 4.6). Simulasi *Montecarlo* dilakukan untuk mendapatkan nilai *probability of failure* (PoF) dari masing-masing *elbow section*. Simulasi dilakukan untuk masing-masing *elbow section* dengan berbagai variasi jumlah *random number generator* (RNG). Variasi jumlah RNG bertujuan sebagai validasi nilai PoF, dengan demikian akan didapatkan nilai PoF yang konstan dan mampu mewakili nilai peluang kegagalan yang sebenarnya dilapangan. Rangkuman hasil simulasi *Montecarlo* yang telah dilakukan disajikan dalam tabel 4.11 sampai tabel 4.14 dan gambar 4.13 sampai gambar 4.16 sebagai berikut:

Tabel 4.11 Hasil simulasi *Montecarlo* pada *elbow section 1*

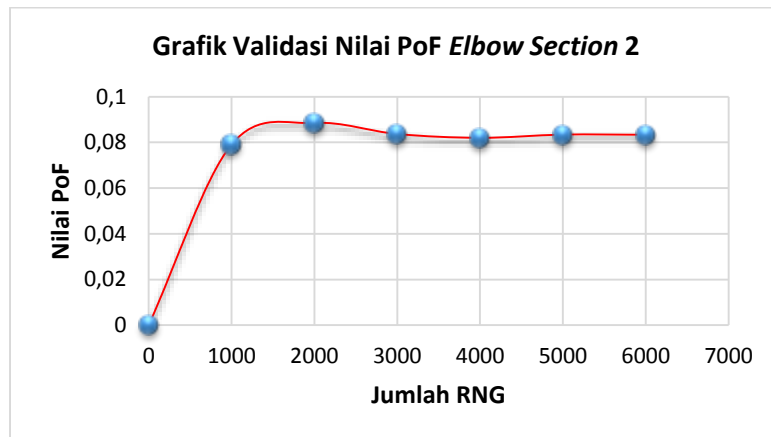
No	Jumlah RNG	Nilai PoF
1	0	0
2	1000	0,076
3	2000	0,077
4	3000	0,073
5	4000	0,080
6	5000	0,086
7	6000	0,085
8	7000	0,079
9	8000	0,074
10	9000	0,078
11	10000	0,078



Gambar 4.13 Grafik hasil simulasi *Montecarlo* pada *elbow section 1* dengan berbagai variasi jumlah RNG

Tabel 4.12 Hasil simulasi *Montecarlo* pada *elbow section 2*

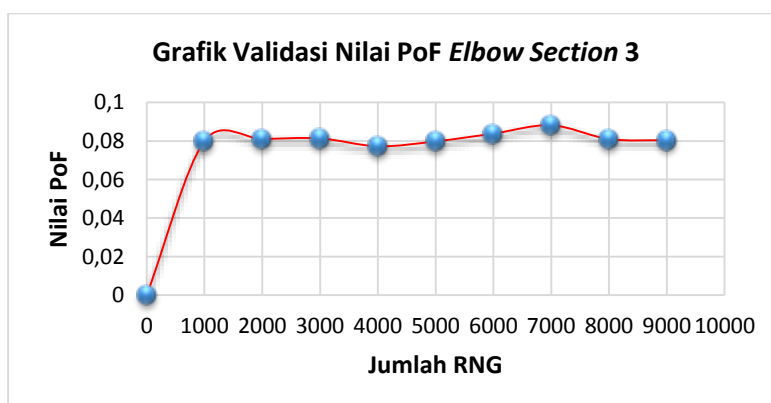
No	Jumlah RNG	Nilai PoF
1	0	0
2	1000	0,079
3	2000	0,089
4	3000	0,084
5	4000	0,082
6	5000	0,083
7	6000	0,083



Gambar 4.14 Grafik hasil simulasi *Montecarlo* pada *elbow section 2* dengan berbagai variasi jumlah RNG

Tabel 4.13 Hasil simulasi *Montecarlo* pada *elbow section 3*

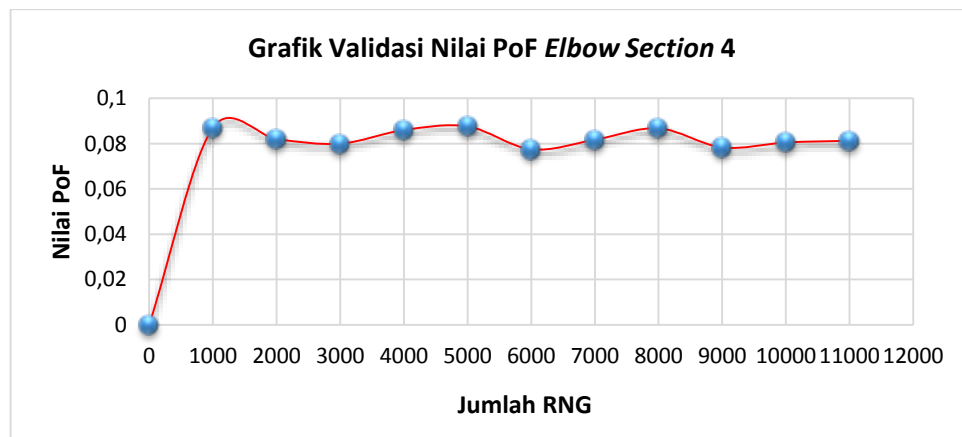
No	Jumlah RNG	Nilai PoF
1	0	0
2	1000	0,080
3	2000	0,081
4	3000	0,081
5	4000	0,077
6	5000	0,080
7	6000	0,084
8	7000	0,088
9	8000	0,081
10	9000	0,080



Gambar 4.15 Grafik hasil simulasi *Montecarlo* pada *elbow section 3* dengan berbagai variasi jumlah RNG

Tabel 4.14 Hasil simulasi *Montecarlo* pada *elbow section 4*

No	Jumlah RNG	Nilai PoF
1	0	0
2	1000	0,087
3	2000	0,082
4	3000	0,080
5	4000	0,086
6	5000	0,088
7	6000	0,078
8	7000	0,082
9	8000	0,087
10	9000	0,078
11	10000	0,081
12	11000	0,081



Gambar 4.16 Grafik hasil simulasi *Montecarlo* pada *elbow section 4* dengan berbagai variasi jumlah RNG

Untuk mempermudah dalam melihat kestabilan nilai PoF, maka hasil simulasi dari masing-masing *elbow section* ditampilkan dalam bentuk grafik (grafik 4.13 – 4.16). Dari grafik tersebut dapat disimpulkan bahwa masing-masing simulasi untuk setiap *elbow section* mencapai kestabilan pada jumlah RNG yang berbeda. Untuk simulasi pada *elbow section 1* mencapai kestabilan pada jumlah RNG 9000 dengan nilai PoF sebesar 0,078. Simulasi pada *elbow section 2* mencapai kestabilan pada jumlah RNG 5000 dengan nilai PoF sebesar 0,083. Simulasi pada *elbow section 3* mencapai kestabilan pada jumlah RNG 8000 dengan nilai PoF sebesar 0,081. *Elbow section*

4 mencapai kestabilan pada simulasi dengan jumlah RNG 10000 dengan nilai PoF sebesar 0,081. Dapat diketahui bahwa *elbow section 2* memiliki nilai PoF paling besar dari seluruh *elbow section* yang diuji dan *elbow section 1* memiliki nilai PoF paling kecil dengan selisih nilai PoF diantara keduanya sebesar 0,5%. Hal tersebut disebabkan karena pada *elbow section 2*, aliran fluida didalam pipa membelok kebawah (mendekati inti bumi), sehingga pengaruh gravitasi menjadi lebih besar dan searah aliran fluida. Akibat dari pengaruh gravitasi tersebut maka aliran massa fluida menjadi lebih besar, yang berakibat pada laju korosi-erosi *elbow section* yang dilewati massa fluida tersebut. Sebaliknya, nilai PoF paling kecil dimiliki oleh *elbow section 1* tersebut dikarenakan aliran fluida yang menuju *elbow section 1* mengikuti jalur pipa lurus, sehingga aliran fluida cenderung laminar. Ketika aliran fluida tersebut mencapai *elbow section 4*, maka pola aliran fluida baru berubah menjadi aliran turbulen, sehingga kecepatan aliran fluida pada bagian *elbow section 4* menjadi relatif lebih tinggi dibandingkan dengan pada bagian pipa lurus. Namun demikian, kecepatan aliran fluida pada *elbow section 1* relatif paling kecil dibanding *elbow section* lainnya. Sehingga nilai laju korosi-erosi *elbow section 1* merupakan paling kecil dibanding ketiga *elbow section* lainnya, akibatnya nilai PoF *elbow section 1* merupakan paling kecil diantara lainnya. Untuk *elbow section 3* dan *elbow section 4* menunjukkan nilai PoF yang relatif sama.

4.8 Analisa Konsekuensi dengan Metode Semi-Kuantitatif RBI

Analisa konsekuensi dengan metode semi-kuantitatif RBI mencakup beberapa langkah. Langkah pertama adalah menentukan jenis fluida representatif. Berdasarkan data dari PT. Pertamina EP *Field* Sangasanga diketahui bahwa fluida yang mengalir dalam jaringan pipa yang ditinjau memiliki nilai *API Gravity* sebesar 45,8. Untuk mengetahui jenis fluida representatif, data yang dibutuhkan adalah berupa nilai massa jenis (*density*) dari fluida yang ditinjau. Untuk mendapatkan nilai massa jenis dari fluida, bisa menggunakan nilai *specific gravity* (SG) yang bisa diketahui menggunakan persamaan *API Gravity* berikut:

$$SG \text{ at } 60^{\circ}F = \frac{141,5}{API \text{ Gravity} + 131,5} \dots\dots\dots(4.7)$$

Dari perhitungan menggunakan persamaan diatas, didapatkan bahwa nilai SG fluida yang ditinjau adalah sebesar 0,798. Selanjutnya mencari nilai massa jenis fluida dengan menggunakan persamaan sebagai-berikut:

$$Massa \text{ jenis fluida uji} = SG_{fluida \text{ uji}} \times Massa \text{ jenis air murni pada } 60^{\circ}F \dots\dots(4.8)$$

Dengan menggunakan persamaan **4.8** didapatkan nilai massa jenis (*density*) dari fluida yang ditinjau adalah 49,83 lb/ft³. Menurut tabel 7-2 API 581 *Base Resource Document*, karakteristik dari fluida yang memiliki *density* sebesar 49,83 lb/ft³ (\approx 48,38 lb/ft³) adalah seperti ditunjukan dalam **tabel 4.15** berikut:

Tabel 4.15 Properti fluida yang mengalir pada jaringan pipa PT. Pertamina EP *Field* Sangasanga, Kalimantan Timur.

No	Properti Fluida	Nilai	Satuan
1	Berat molekul	280	gram/mol
2	Berat jenis	49,83	lb/ft ³
3	Jenis rantai hidrokarbon	C17 - C25	
4	Tingkat keadaan	<i>Liquid</i>	
5	Temperatur <i>autoignition</i>	396	°F
6	<i>Normal Boiling Point</i> (NBP)	651	°F

Pada analisa konsekuensi menggunakan metode semi-kuantitatif, konsekuensi kegagalan akibat terlepasnya fluida representatif terdiri atas dua bagian:

1. Konsekuensi akibat terlepasnya fluida representatif yang mudah terbakar.
2. Konsekuensi akibat terlepasnya fluida representatif yang beracun.

Jenis fluida yang mengalir pada jaringan pipa yang ditinjau dalam penelitian ini adalah hidrokarbon cair yang memiliki rantai C17-C25. Oleh karena hal tersebut, fluida representatif ini hanya memiliki sifat mudah terbakar.

4.8.1 Analisa Laju Pelepasan Fluida

Karena fluida yang mengalir pada jaringan pipa yang ditinjau memiliki fasa cair (*liquid*), maka persamaan fluida yang dipakai untuk mencari nilai laju keluar fluida adalah persamaan 7.1 API 581 *Base Resourced Document*. Persamaan tersebut adalah sebagai berikut:

$$Ql = CdA \sqrt{2\rho - \rho \frac{gc}{144}} \dots\dots\dots(4.9)$$

- Ql = Laju keluar fluida cair (lb/s)
- Cd = Koefisien keluaran (0,60 – 0,64)
- A = Luas penampang lubang kebocoran (in²)
- ρ = Berat jenis fluida (lb/ft³)
- gc = Faktor konversi untuk merubah lbf ke lbfm (32,2 lbfm-ft/lbf-s²).

Laju pelepasan fluida cair yang ditinjau untuk ukuran lubang ¼ in, 1 in, 4 in, dan pecah (6 in) disajikan dalam **tabel 4.16** berikut:

Tabel 4.16 Laju pelepasan fluida pada setiap *elbow section* yang ditinjau

No	Jenis Elbow	Ukuran Lubang Kebocoran (inchi)			
		1/4	1	4	6
		Laju Pelepasan Fluida (lb/sec)			
1	Elbow 1	0,28	4,54	73,26	167,50
2	Elbow 2	0,29	4,62	74,45	169,63
3	Elbow 3	0,29	4,64	74,68	170,16
4	Elbow 4	0,28	4,60	74,21	168,57

4.8.2 Penentuan Jenis Pelepasan Fluida

Berdasarkan API 581 *Base Resourced Document* gambar 7-2 diketahui bahwa untuk menentukan apakah kebocoran yang terjadi termasuk dalam jenis kebocoran seketika atau kebocoran kontinyu adalah dengan menghitung laju aliran massa yang keluar dalam waktu 3 menit. Jika dalam waktu 3 menit massa fluida representatif

yang keluar lebih besar dari 10.000 lb, maka aliran tersebut termasuk kedalam jenis kebocoran seketika (*instaneous*), sedangkan jika jumlah yang keluar kurang dari 10.000 lb, maka termasuk jenis kebocoran terus-menerus (*continous*). Berikut disajikan data hasil perhitungan tentang jenis pelepasan fluida pada masing-masing *elbow* yang ditinjau:

Tabel 4.17 Jenis pelepasan fluida pada *elbow section 1*

No	Ukuran Lubang Kebocoran (inchi)	Jumlah fluida terlepas dalam waktu 3 menit (lbs)	Jenis Pelepasan Fluida
1	$\frac{1}{4}$	50,68	Terus menerus
2	1	817,58	Terus menerus
3	4	13187,68	Seketika
4	6	30150,86	Seketika

Tabel 4.18 Jenis pelepasan fluida pada *elbow section 2*

No	Ukuran Lubang Kebocoran (inchi)	Jumlah fluida terlepas dalam waktu 3 menit (lbs)	Jenis Pelepasan Fluida
1	$\frac{1}{4}$	51,51	Terus menerus
2	1	830,88	Terus menerus
3	4	13400,38	Seketika
4	6	30533,73	Seketika

Tabel 4.19 Jenis pelepasan fluida pada *elbow section 3*

No	Ukuran Lubang Kebocoran (inchi)	Jumlah fluida terlepas dalam waktu 3 menit (lbs))	Jenis Pelepasan Fluida
1	$\frac{1}{4}$	51,93	Terus menerus
2	1	834,87	Terus menerus
3	4	13442,92	Seketika
4	6	30629,44	Seketika

Tabel 4.20 Jenis pelepasan fluida pada *elbow section 4*

No	Ukuran Lubang Kebocoran (inchi)	Jumlah fluida terlepas dalam waktu 3 menit (lbs)	Jenis Pelepasan Fluida
1	$\frac{1}{4}$	51,10	Terus menerus
2	1	828,22	Terus menerus
3	4	13357,84	Seketika
4	6	30342,29	Seketika

4.8.3 Penentuan Luas Daerah Kebocoran

Dalam API 581 *Base Resourced Document* terdapat aturan mengenai penentuan luas daerah kebocoran pada peralatan yang dievaluasi. Untuk menentukan luas daerah kebocoran tersebut pertama-tama menentukan *probability-weighted affected area*. Persamaan untuk mencari *probability-weighted affected area* harus disesuaikan dengan jenis rantai hidrokarbon, tipe pelepasan dan temperatur operasional dari fluida yang ada pada peralatan. Karena temperatur operasional fluida yang ditinjau (130°F) dibawah *autoignition temperature* (396°F) *plus* 80°F, maka rumus yang digunakan untuk menentukan luas daerah kebocoran terdapat pada tabel 7.8 dan tabel 7.9 API 581. Berikut disajikan rangkuman rumus yang digunakan dalam perhitungan *probability-weighted affected area*..

Tabel 4.21 Persamaan *probability-weighted affected area*.

No	Jenis Pelepasan Fluida	Konsekuensi kerusakan	Konsekuensi Bahaya
1	Terus menerus (<i>Continuous</i>)	$A = 20 x^{0,90}$	$A = 57 x^{0,89}$
2	Seketika (<i>instantaneous</i>)	$A = 0,11 x^{0,91}$	$A = 0,32 x^{0,91}$

Dengan:

A = *Probability-weighted affected area* daerah kerusakan / daerah berbahaya (ft²)

x = Laju pelepasan total (lb/second)

Berikut disajikan tabel *probability-weighted affected area* untuk luas daerah kerusakan dan luas daerah berbahaya.

Tabel 4.22 *Probability-weighted affected area* daerah kerusakan.

No	Jenis Elbow	Ukuran Lubang Kebocoran (inchi)			
		¼	1	4	6
		Luas Daerah Kerusakan (ft ²)			
1	Elbow 1	6,39	78,08	5,48	11,62
2	Elbow 2	6,49	79,23	5,56	11,76
3	Elbow 3	6,53	79,57	5,57	11,79
4	Elbow 4	6,44	78,10	5,54	11,69

Tabel 4.23 *Probability-weighted affected area* daerah berbahaya

No	Jenis <i>Elbow</i>	Ukuran Lubang Kebocoran (inchi)			
		1/4	1	4	6
		Luas Daerah Berbahaya (ft ²)			
1	<i>Elbow 1</i>	18,45	219,20	15,93	15,68
2	<i>Elbow 2</i>	18,72	222,37	16,16	15,83
3	<i>Elbow 3</i>	18,85	223,32	16,21	15,87
4	<i>Elbow 4</i>	18,58	221,73	16,12	15,76

Nilai konsekuensi keterbakaran terdiri dari luas daerah kerusakan dan luas daerah berbahaya. Dalam menentukan luas daerah keterbakaran, pertama-tama menjumlahkan masing-masing luas daerah kerusakan dan luas daerah berbahaya pada tiap-tiap *elbow* untuk seluruh ukuran lubang kebocoran. Luas daerah yang didapat adalah *probability-weighted affected area*. Selanjutnya *probability-weighted affected area* dikalikan dengan nilai *specific event probability* (*Probability of Failure*) untuk masing-masing *elbow*. Dari hasil perkalian tersebut didapatkan nilai *combined consequence area* untuk daerah kerusakan dan daerah berbahaya pada masing-masing *elbow*. Langkah terakhir adalah menjumlahkan *combined consequence area* untuk daerah kerusakan dan daerah berbahaya pada masing-masing *elbow*. Jumlah *combined consequence area* tersebut merupakan luas daerah kebocoran untuk masing-masing *elbow*. Berikut disajikan tabel luas daerah kebocoran untuk masing-masing *elbow*:

Tabel 4.24 Luas kombinasi untuk kategori luas daerah kerusakan

No	Jenis <i>Elbow</i>	Ukuran Lubang Kebocoran (inchi)				Total daerah kerusakan (ft ²)	<i>Probability of Failure (PoF)</i>	<i>Acombination</i> Kerusakan (ft ²)
		¼	1	4	6			
		Luas Daerah Kerusakan (ft ²)						
1	<i>Elbow 1</i>	6,39	78,08	5,48	11,62	101,57	0,078	7,89
2	<i>Elbow 2</i>	6,49	79,23	5,56	11,76	103,02	0,083	8,59
3	<i>Elbow 3</i>	6,53	79,57	5,57	11,79	103,46	0,081	8,38
4	<i>Elbow 4</i>	6,44	79,00	5,54	11,69	102,67	0,081	8,27

Tabel 4.25 Luas kombinasi untuk kategori luas daerah berbahaya

No	Jenis Elbow	Ukuran Lubang Kebocoran (inchi)				Total daerah berbahaya (ft ²)	Probability of Failure (PoF)	A _{combination} Berbahaya (ft ²)
		1/4	1	4	6			
		Luas Daerah Berbahaya (ft ²)						
1	Elbow 1	18,451	219,197	15,930	15,682	269,260	0,078	20,91
2	Elbow 2	18,720	222,367	16,163	15,833	273,083	0,083	22,77
3	Elbow 3	18,854	223,316	16,210	15,871	274,252	0,081	22,21
4	Elbow 4	18,585	221,733	16,117	15,758	272,193	0.081	21,91

Tabel 4.26 Luas daerah keterbakaran akibat kebocoran

No	Jenis Elbow	A _{combination} Kerusakan (ft ²)	A _{combination} Berbahaya (ft ²)	A _{comb} (ft ²)
1	Elbow 1	7,89	20,91	28,80
2	Elbow 2	8,59	22,77	31,37
3	Elbow 3	8,38	22,21	30,59
4	Elbow 4	8,26	21,91	30,18

4.8.4 Penentuan Konsekuensi Kegagalan

Konsekuensi kegagalan ditentukan berdasarkan luas daerah keterbakaran akibat terjadinya kebocoran. Penentuan kategori konsekuensi menggunakan tabel B-3 pada API 581 *Base Resources Document*. Kategori konsekuensi untuk masing-masing *elbow* disajikan dalam **tabel 4.27** berikut:

Tabel 4.27 Luas daerah keterbakaran dan kategori konsekuensi masing-masing *elbow section*

No	Jenis Elbow	A _{combination} Kerusakan (ft ²)	A _{combination} Berbahaya (ft ²)	A _{comb} (ft ²)	Kategori Konsekuensi
1	Elbow 1	7,89	20,91	28,80	B
2	Elbow 2	8,59	22,77	31,37	B
3	Elbow 3	8,38	22,21	30,59	B
4	Elbow 4	8,26	21,91	30,18	B

Kategori konsekuensi untuk masing-masing *elbow* diketahui dari tabel B-3 API 581 *Base Resourced Document* yaitu dengan mencocokkan total luas daerah frekuensi kegagalan masing-masing *elbow* dengan rentang luas daerah kerusakan yang ada pada tabel B-3 tersebut. Dari tabel diatas diketahui bahwa keempat *elbow* yang ditinjau memiliki kategori konsekuensi yang sama, yaitu kategori B.

4.9 Likelihood Analysis

Dalam metode RBI, nilai *likelihood* diperoleh dari nilai TMSF. Semua peralatan yang dianalisis serta kondisi operasi peralatan apapun harus melewati TMSF ini. Untuk mencari nilai TMSF dari peralatan yang diamati, terlebih dahulu harus diketahui harga kontanta reduksi ketebalan material konstruksi. Persamaan untuk mencari nilai konstanta tersebut terdapat pada API 581 *Base Resources Documents*, seperti berikut:

$$\frac{(a.r)}{t} \dots\dots\dots(4.10)$$

dengan,

a = waktu pemakaian peralatan yang diamati

r = laju korosi-erosi (ipy)

t = tebal awal peralatan (in)

pada persamaan diatas terdapat 3 variabel penentu nilai konstanta reduksi ketebalan material konstruksi yaitu nilai waktu pemakaian peralatan yang diamati (a), laju korosi-erosi (r), dan tebal peralatan (t). Secara spesifik, nilai (a) yang digunakan merupakan lamanya peralatan beroperasi hingga saat ini atau umur peralatan, nilai (r) laju rata-rata kororosi-erosi per-tahun, dan (t) merupakan nilai ketebalan awal peralatan. Berikut merupakan nilai konstanta reduksi ketebalan material konstruksi untuk masing-masing *elbow section*.

Tabel 4.28 Nilai konstanta reduksi ketebalan material konstruksi untuk setiap *elbow section*.

No	Jenis Elbow	Nilai Variabel			Konstanta Reduksi Ketebalan Material Konstruksi (ar/t)
		a (years)	r (in/year)	t (in)	
1	Elbow Section 1	2	0,00257	0,28	0,018
2	Elbow Section 2	2	0,00298	0,28	0,021
3	Elbow Section 3	2	0,00268	0,28	0,019
4	Elbow Section 4	2	0,00286	0,28	0,020

Selanjutnya adalah menentukan jumlah inspeksi yang telah dilakukan selama pipeline beroperasi. Inspeksi tahunan (*annual inspection*) dilakukan terhadap

peralatan, sehingga jumlah inspeksi yang dilakukan terhadap struktur sampai saat ini adalah sebanyak 2 kali. Kualitas inspeksi yang dilakukan terhadap peralatan kemungkinan besar termasuk salah satu dari 2 kategori ringan, yaitu kategori *poorly effective* atau *fairly effective*. Setelah didapatkan data-data berikut, maka selanjutnya adalah menentukan nilai TMSF berdasarkan tabel 9-12 API 581 *Base Resource Document*. Berikut nilai TMSF untuk masing-masing *elbow section* yang ditinjau:

Tabel 4.29 Nilai TMSF untuk masing-masing *elbow section*

No	Jenis Elbow	Nilai TMSF	
		<i>Poorly Effective</i>	<i>Fairly Effective</i>
1	<i>Elbow Section 1</i>	1	1
2	<i>Elbow Section 2</i>	1	1
3	<i>Elbow Section 3</i>	1	1
4	<i>Elbow Section 4</i>	1	1

Setelah mendapatkan data-data tersebut, maka selanjutnya kita dapat mengetahui nilai *likelihood category* berdasarkan tabel B-5 API 581. Berikut *likelihood category* untuk masing-masing *elbow section*:

Tabel 4.30 *Likelihood category* untuk masing-masing *elbow section*

No	Jenis Elbow	<i>Likelihood Category</i>
1	<i>Elbow Section 1</i>	1
2	<i>Elbow Section 2</i>	1
3	<i>Elbow Section 3</i>	1
4	<i>Elbow Section 4</i>	1

Dari tabel 4.30 dapat disimpulkan bahwa keempat *elbow section* yang ditinjau berada pada *likelihood category* yang sama yaitu kategori 1.

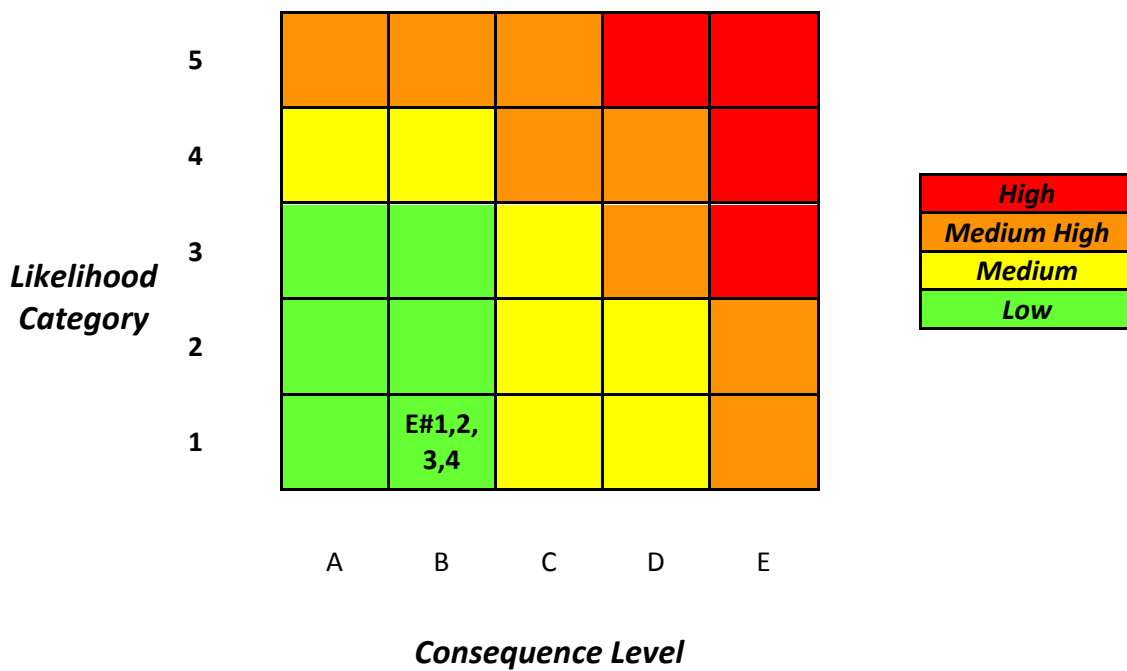
4.10 Penentuan Tingkat Risiko Semi-Kuantitatif

Tingkat risiko untuk metode semi-kuantitatif RBI 581 merupakan kombinasi dari kategori kemungkinan kegagalan (*likelihood category*) dan tingkat konsekuensi

kegagalan (*consequence level*). Tingkat risiko yang didapatkan adalah sebagai berikut:

Tabel 4.31 Rangkuman *Consequence level* dan *likelihood category* untuk masing-masing *elbow section*

No	Jenis Elbow	Consequence Level	Likelihood Category
1	Elbow Section 1	B	1
2	Elbow Section 2	B	1
3	Elbow Section 3	B	1
4	Elbow Section 4	B	1



Gambar 4.17 Matriks risiko untuk seluruh *elbow section* yang ditinjau

Dari gambar 4.17 dapat disimpulkan bahwa keempat *elbow section* yang ditinjau memiliki tingkatan risiko yang sama yaitu tingkatan risiko rendah (*low risk*).

4.11 Perencanaan Inspeksi

Manajemen inspeksi menggunakan metode RBI memungkinkan sebuah perusahaan untuk mengelola biaya inspeksi secara lebih efektif dan efisien. Dengan mengetahui tingkat risiko dari masing-masing peralatan (*equipment*), maka perusahaan dapat memfokuskan inspeksi pada peralatan-peralatan yang memiliki tingkat risiko tinggi. Sebaliknya, perusahaan juga dapat mereduksi biaya inspeksi untuk peralatan dengan tingkat risiko rendah. Dengan demikian, maka biaya inspeksi yang tersedia akan dapat terkelola dengan efektif dan efisien. Berdasarkan analisa risiko yang telah dilakukan pada *elbow section* milik PT. Pertamina EP *Field Sangasanga*, didapatkan hasil berupa tingkat risiko masing-masing *elbow section* yang dapat dijadikan pertimbangan oleh perusahaan yang bersangkutan dalam penentuan manajemen inspeksi yang paling efektif dan efisien.

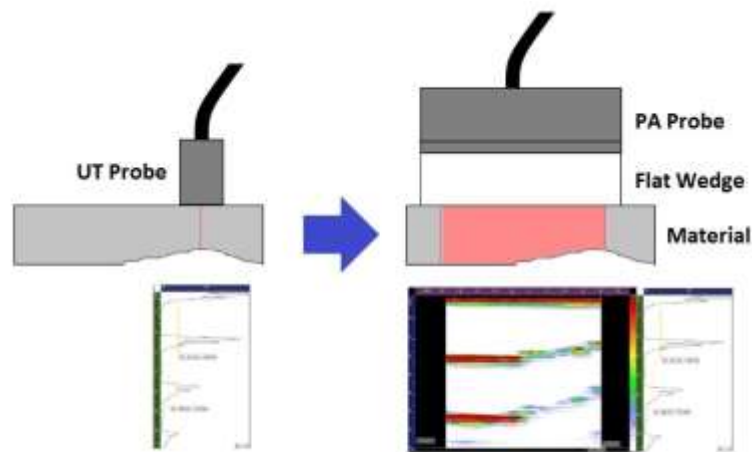
Dalam metode RBI terdapat aturan mengenai integritas inspeksi bagi peralatan statis seperti jaringan pipa yang dikaji dalam penelitian ini. Berikut disajikan tabel integritas inspeksi dalam metode RBI:

Tabel 4.32 Integritas inspeksi pada peralatan statis RBI

No	Jenis Konsekuensi	Jenis Inspeksi
1	Tinggi	<i>Internal Entry</i>
		<i>External NDT</i>
		<i>Corrosion Monitoring</i>
2	Menengah	<i>Internal entry</i>
		<i>External NDT with Process dan Corrosion Monitoring</i>
		<i>Limited Internal Inspection with Process Monitoring</i>
3	Rendah	<i>Limited Internal Inspection</i>
		<i>External Inspection</i>
		<i>Process Riview</i>

Seperti yang dapat dilihat dalam tabel 4.32 diatas, terdapat 3 jenis inspeksi yang bisa diterapkan untuk peralatan dengan kategori konsekuensi rendah. Penentuan jenis inspeksi yang akan diterapkan pada sebuah peralatan harus mempertimbangkan faktor biaya dan kualitas hasil inspeksi. Karena alasan tersebut

maka jenis inspeksi yang disarankan adalah jenis *eksternal inspection*. Jenis *external inspection* yang umum dilakukan untuk mendeteksi ketebalan jaringan pipa adalah metode *ultrasonic straight beam testing* oleh karenanya metode inspeksi ini sangat disarankan untuk kasus penipisan ketebalan peralatan akibat fenomena korosi-erosi internal.



Gambar 4.18 Pengukuran ketebalan pelat menggunakan metode *ultrasonic testing* (*sumber: <http://torngats.ca>*)

Tabel 4.33 Metode inspeksi, durasi inspeksi serta luas area inspeksi berdasarkan API 581 *Base resource Document*

No	Likelihood Category	Consequence Level	Metode Inspeksi	Frekuensi Inspeksi	Luas Area inspeksi
1	Tinggi	Tinggi	U.T	per-12 Bulan	Penuh
2	Tinggi	Menengah	U.T	per-12 Bulan	Parsial
3	Tinggi	Rendah	U.T	per-12 Bulan	Kecil
4	menengah	Tinggi	U.T	per-24 bulan	Penuh
5	menengah	Menengah	U.T	per-30 bulan	Parsial
6	Menengah	Rendah	U.T	per-30 bulan	Kecil
7	Rendah	Tinggi	U.T	per-30 bulan	Penuh
8	Rendah	Menengah	U.T	per-36 bulan	Parsial
9	Rendah	Rendah	U.T	per-48 bulan	Kecil

Berikut disajikan rangkuman perencanaan inspeksi untuk keempat *elbow section* yang ditinjau:

Tabel 4.34 Perencanaan inspeksi untuk keempat *elbow section* yang dievaluasi

No	Jenis <i>Elbow</i>	Metode Inspeksi	Frekuensi Inspeksi	Luas Area Inspeksi
1	<i>Elbow Section 1</i>	U.T	per-48 bulan	Kecil
2	<i>Elbow Section 2</i>	U.T	per-48 bulan	Kecil
3	<i>Elbow Section 3</i>	U.T	per-48 bulan	Kecil
4	<i>Elbow Section 4</i>	U.T	per-48 bulan	Kecil

Berdasarkan tabel 4.34 dapat disimpulkan bahwa untuk peralatan dengan *likelihood category* rendah dan *consequence level* rendah menggunakan metode inspeksi ultrasonic testing (U.T) dengan frekuensi inspeksi sebanyak 48 bulan (4 tahun) sekali dan luas area inspeksi kecil.

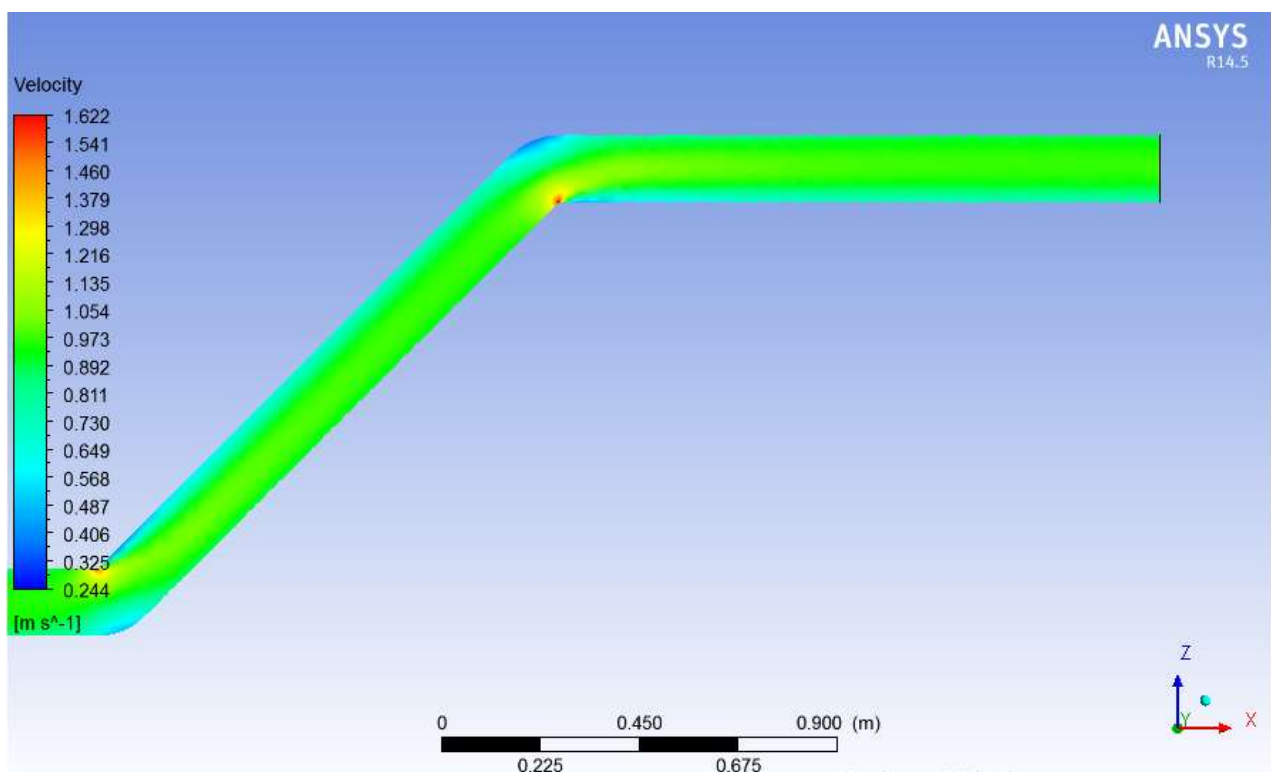
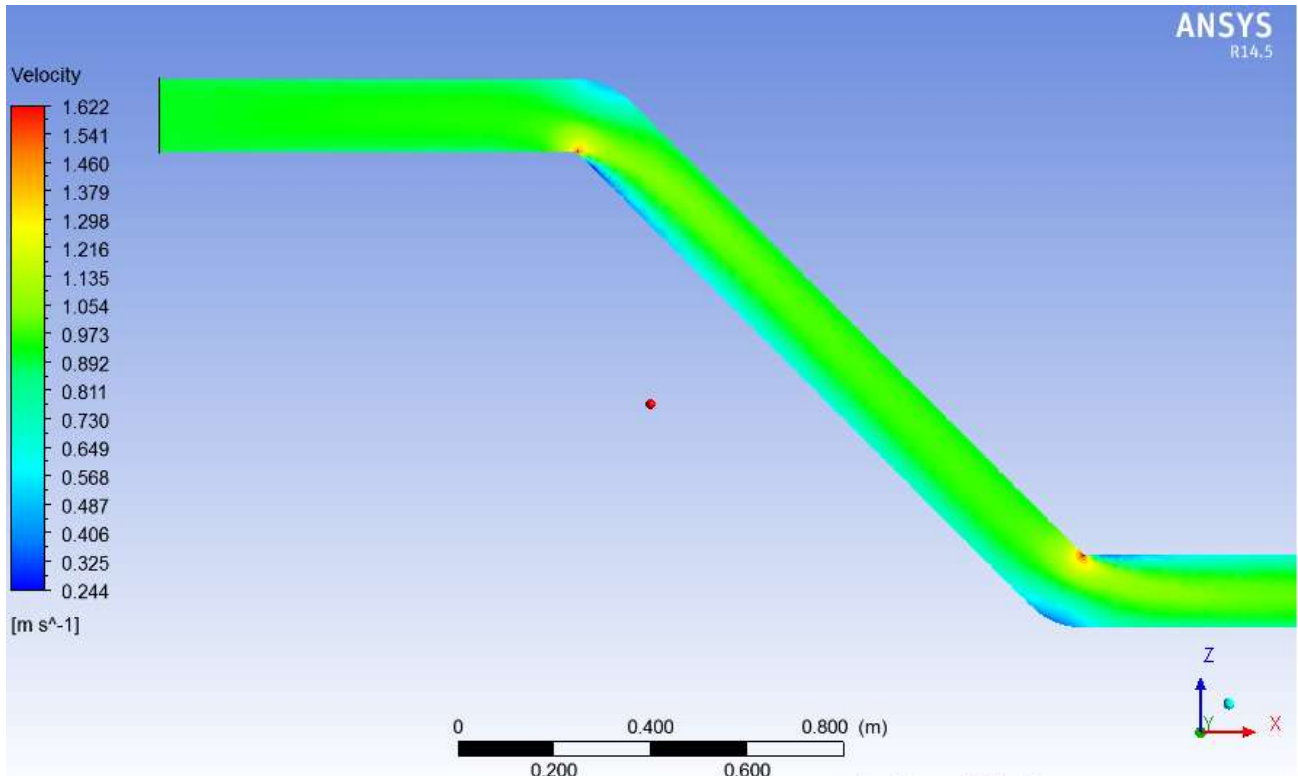
Lampiran A

Output Pemodelan CFD Pada *Software* ANSYS 14.5

Kecepatan rata-rata fluida (ft/s) = 3,21

Tekanan operasional fluida (psi) = 2400

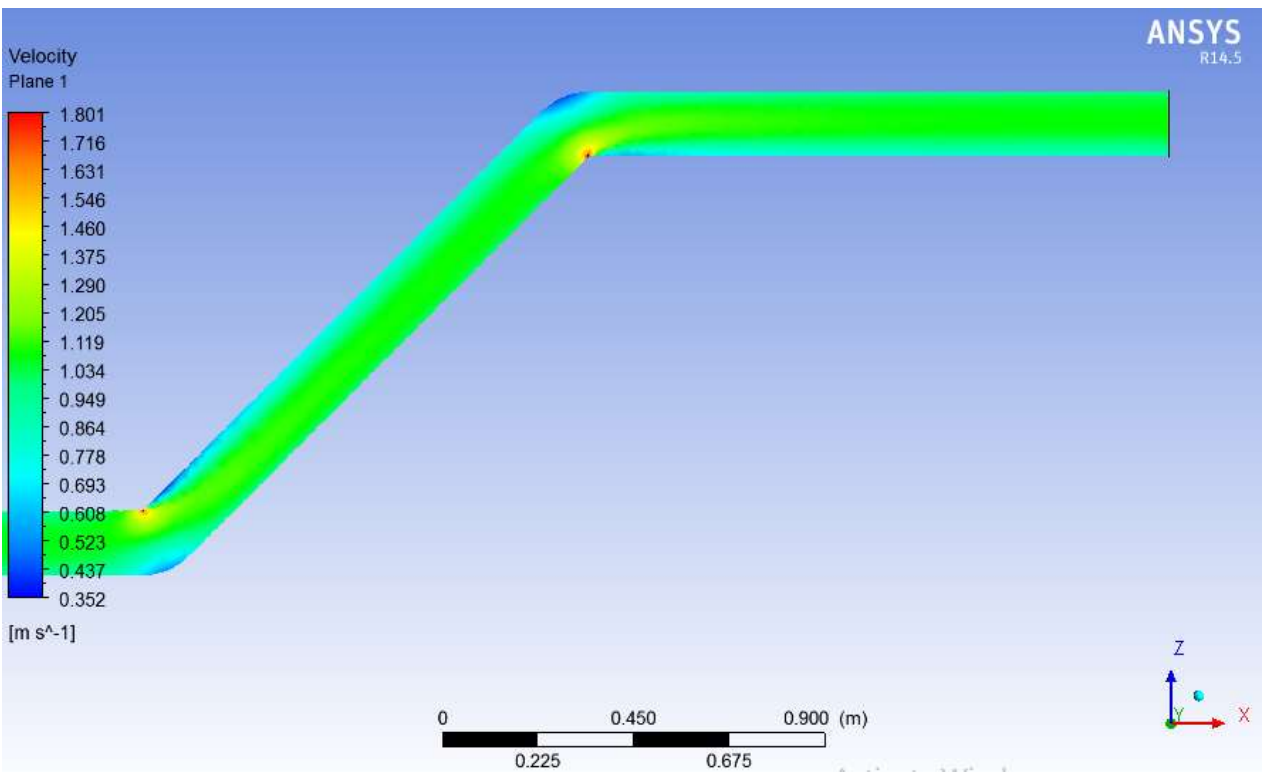
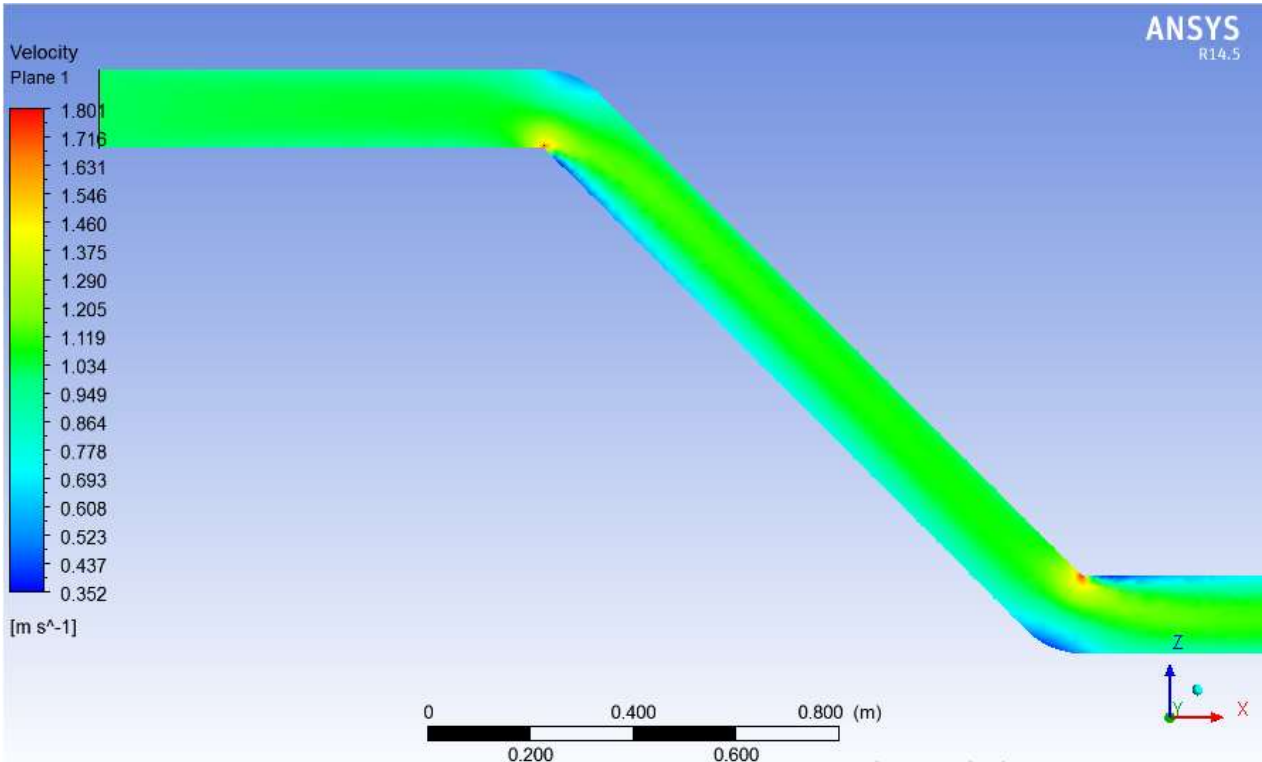
Temperatur operasional fluida (°F) = 110



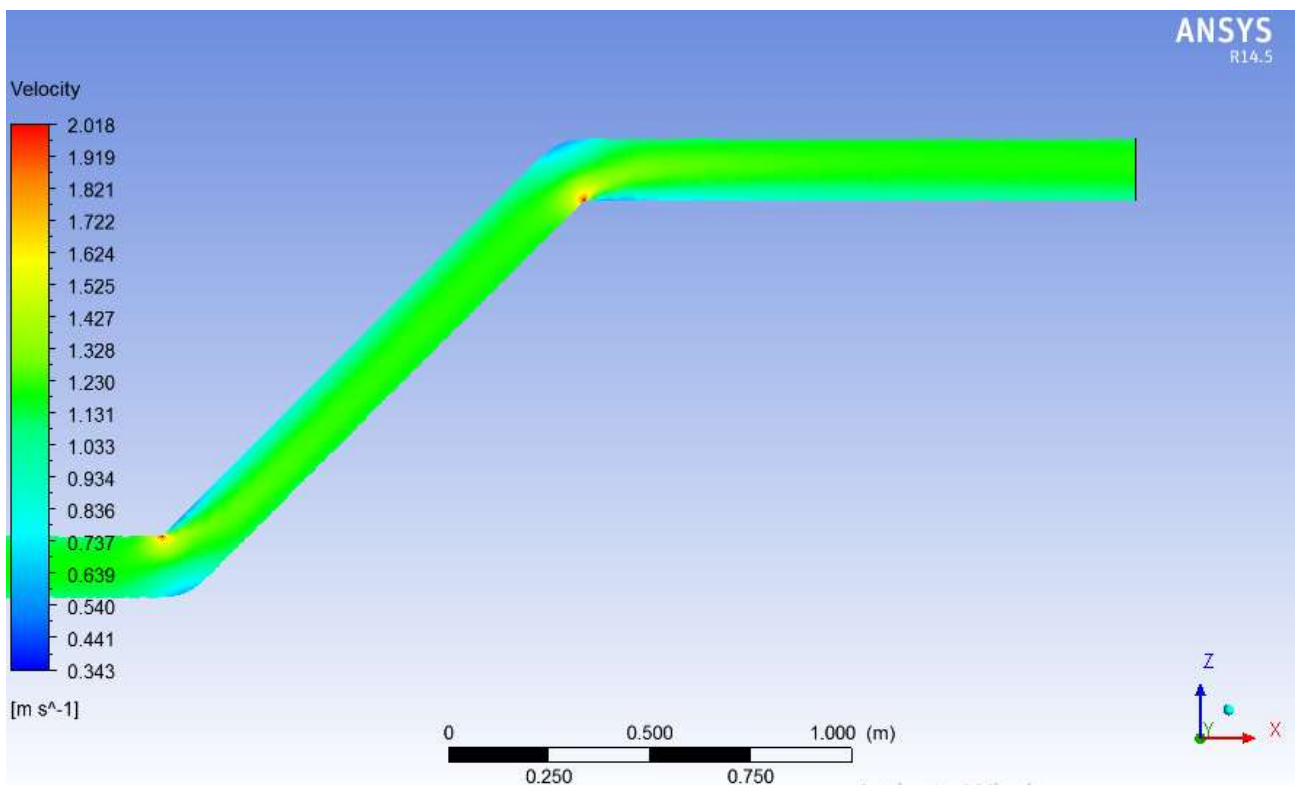
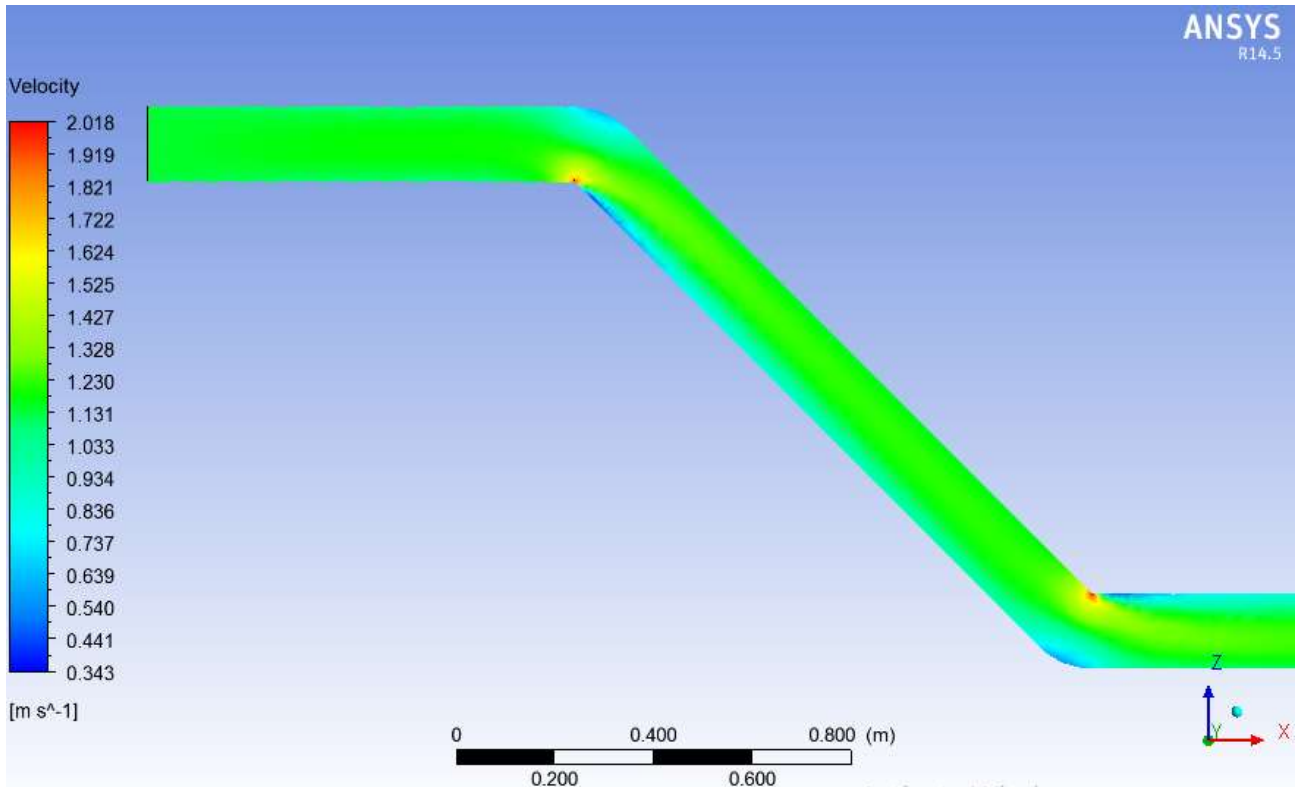
Kecepatan rata-rata fluida (ft/s) = 3,34

Tekanan operasional fluida (psi) = 2420

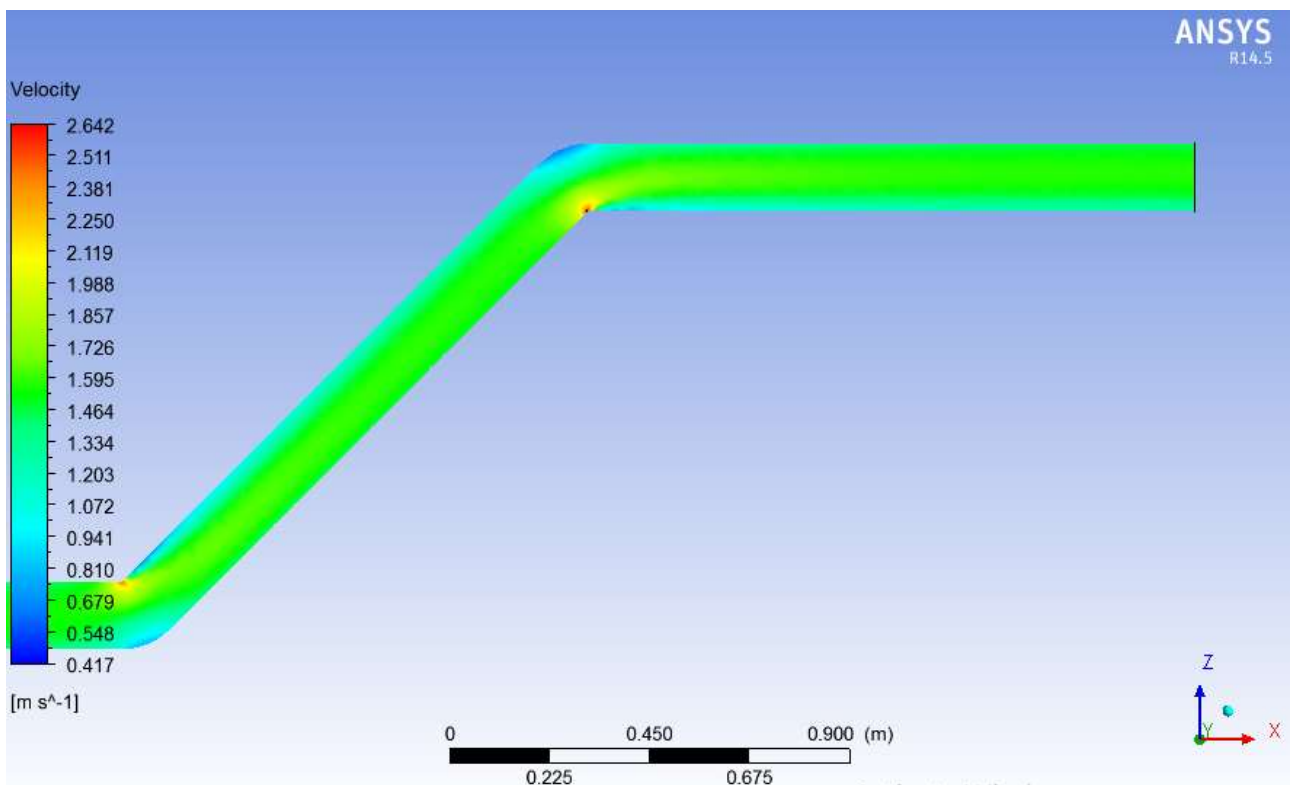
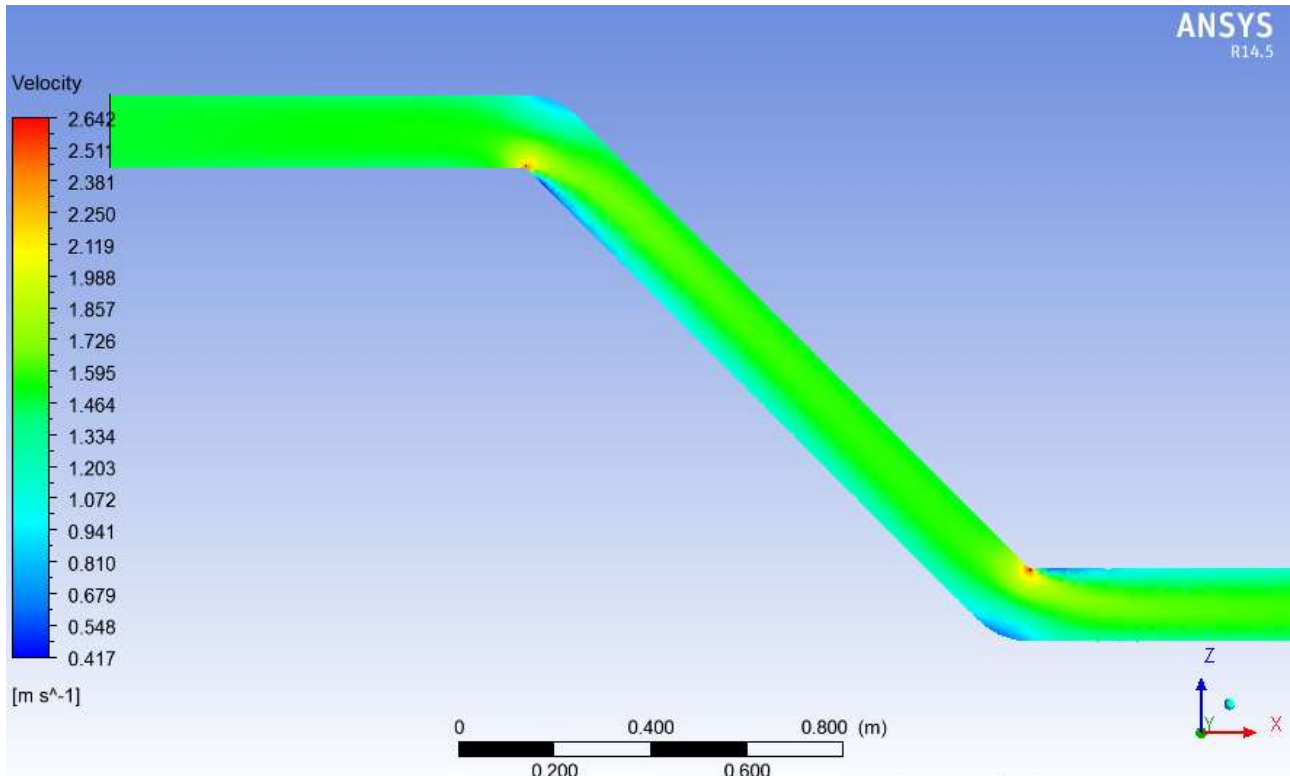
Temperatur operasional fluida (°F) = 113,68



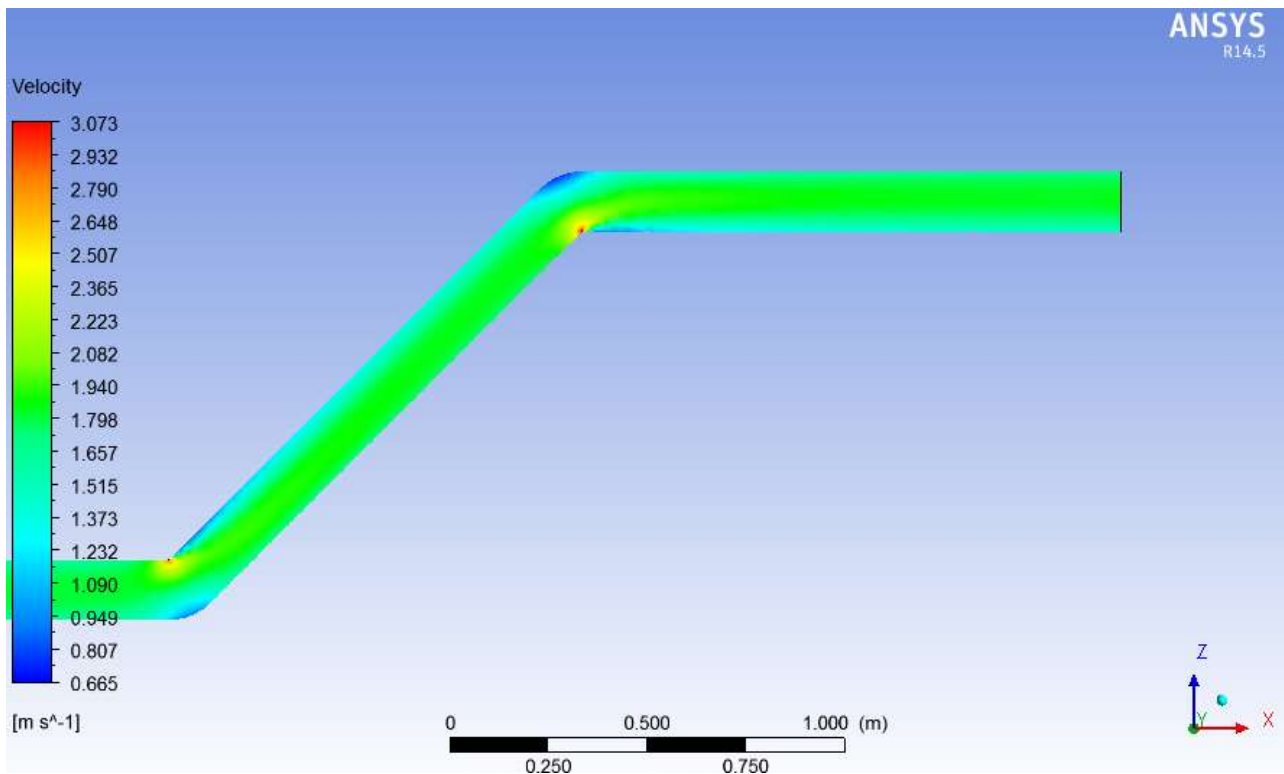
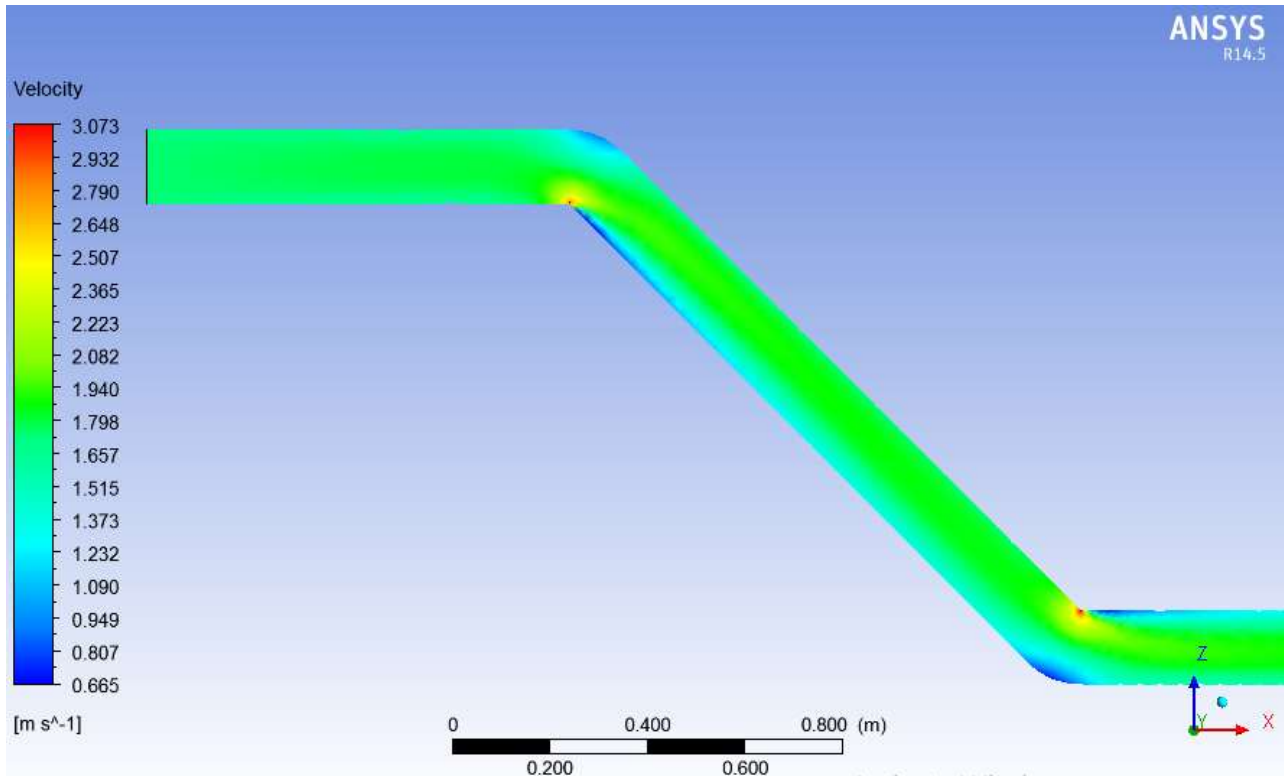
Kecepatan rata-rata fluida (ft/s) = 3,76
Tekanan operasional fluida (psi) = 2478
Temperatur operasional fluida (°F) = 114,99



Kecepatan rata-rata fluida (ft/s) = 4,88
Tekanan operasional fluida (psi) = 2512
Temperatur operasional fluida (°F) = 115,77



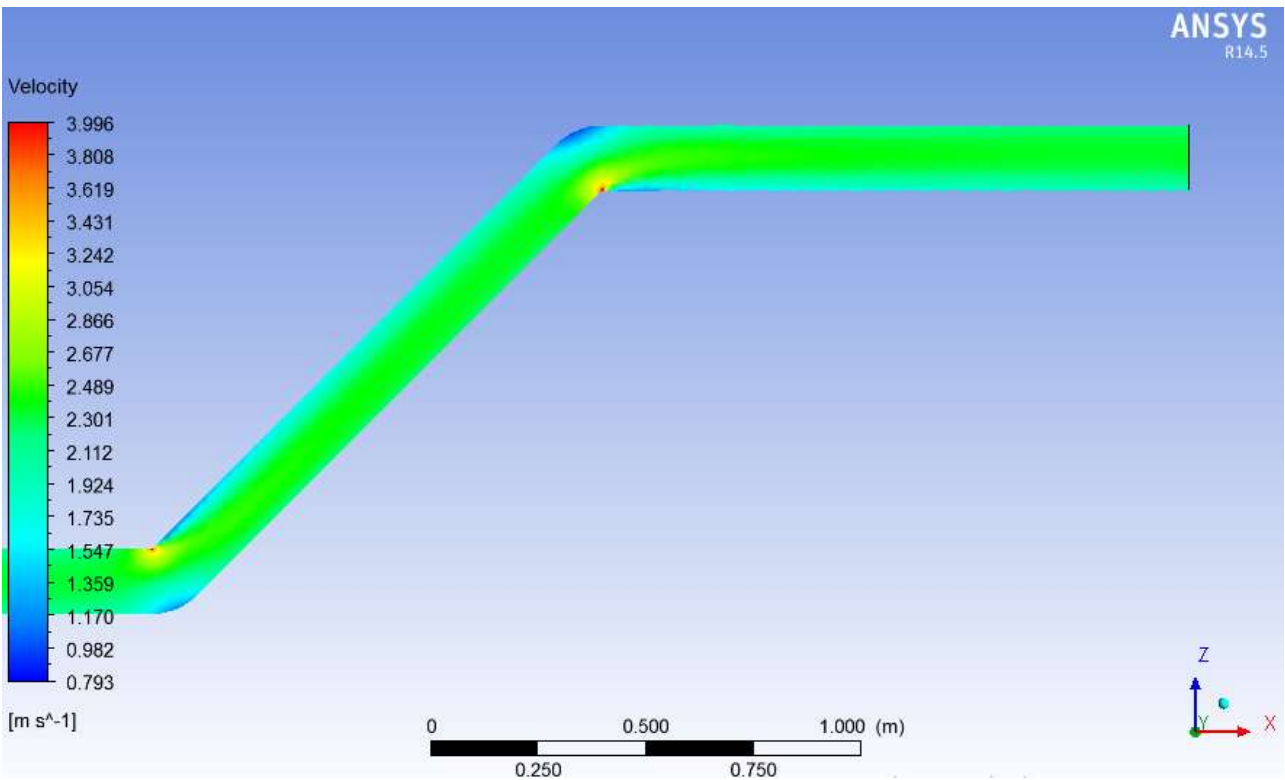
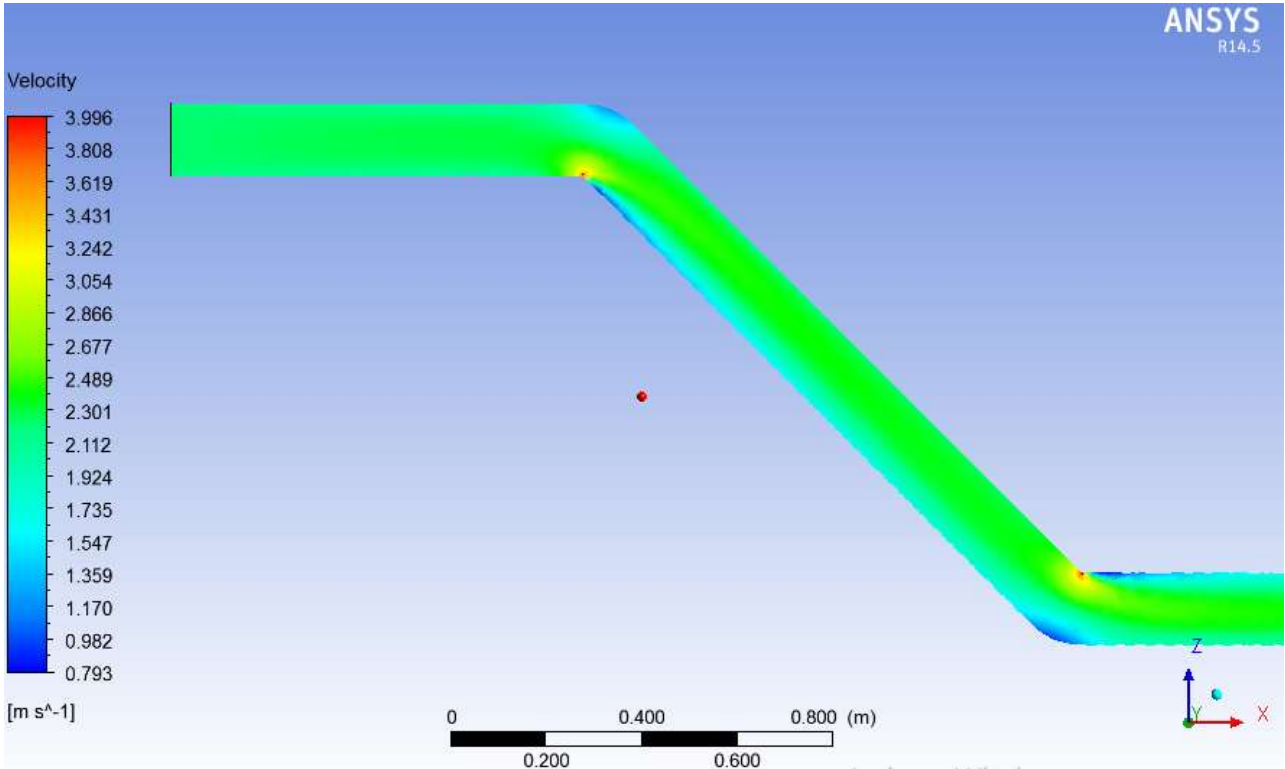
Kecepatan rata-rata fluida (ft/s) = 5,73
Tekanan operasional fluida (psi) = 2580
Temperatur operasional fluida (°F) = 116,19



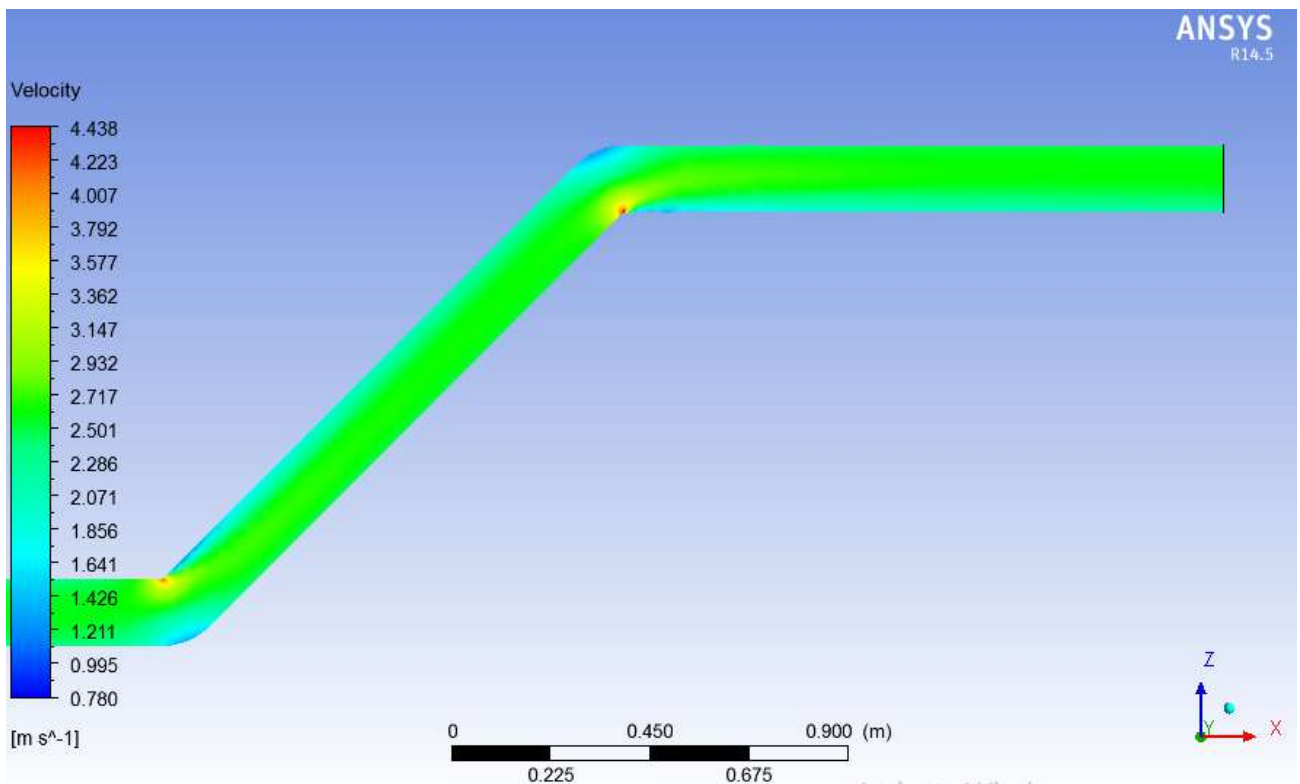
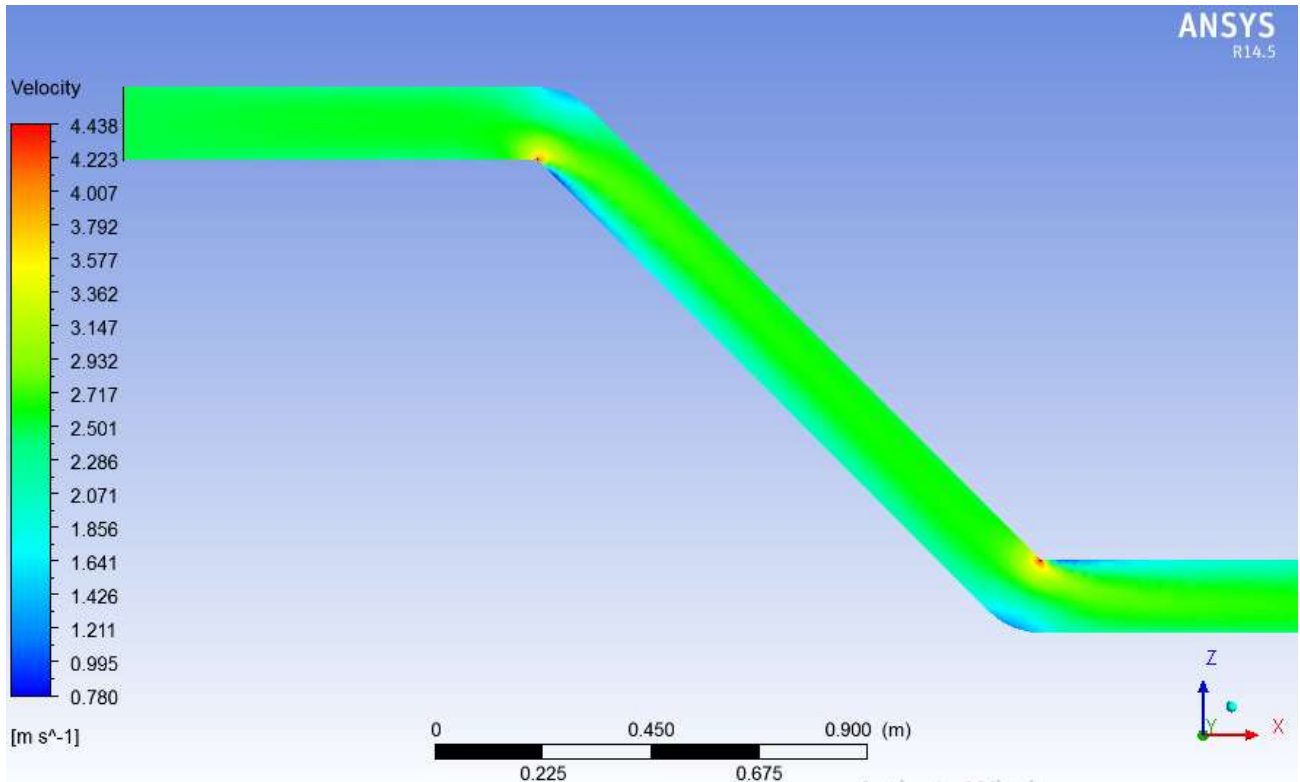
Kecepatan rata-rata fluida (ft/s) = 7,33

Tekanan operasional fluida (psi) = 2686

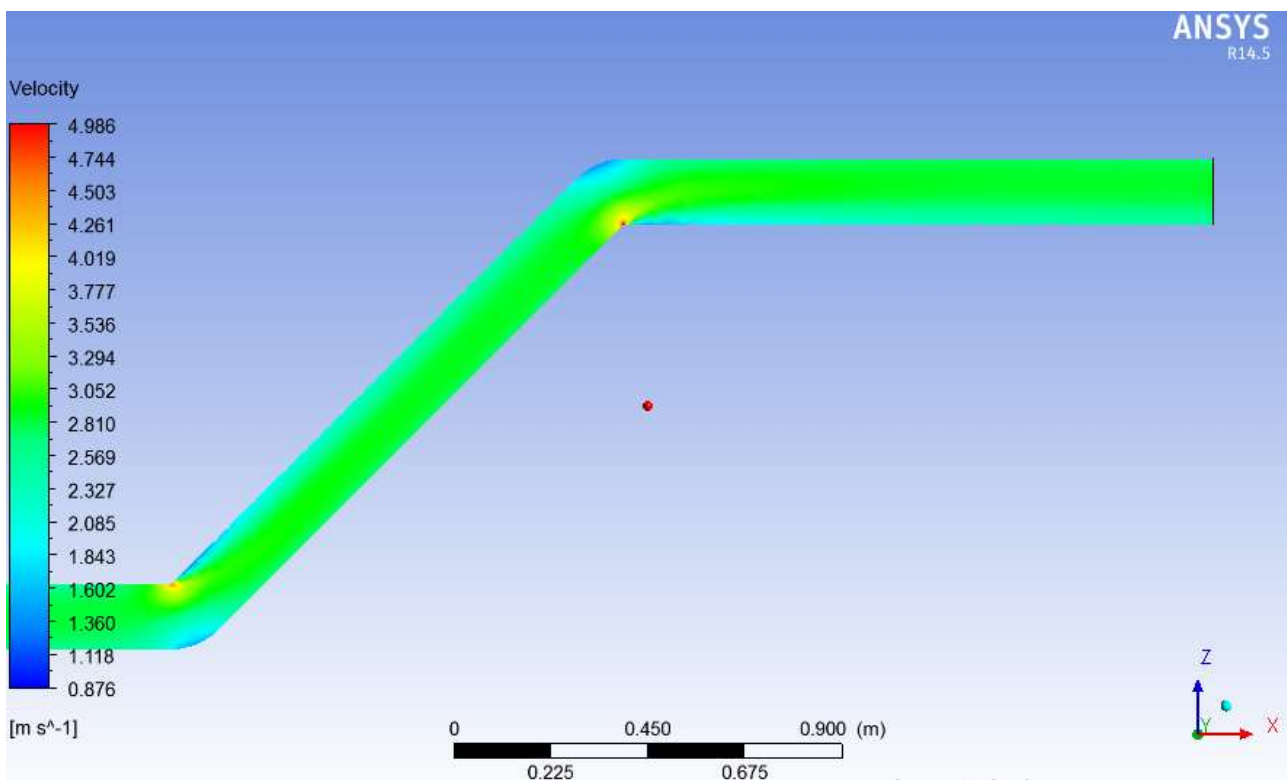
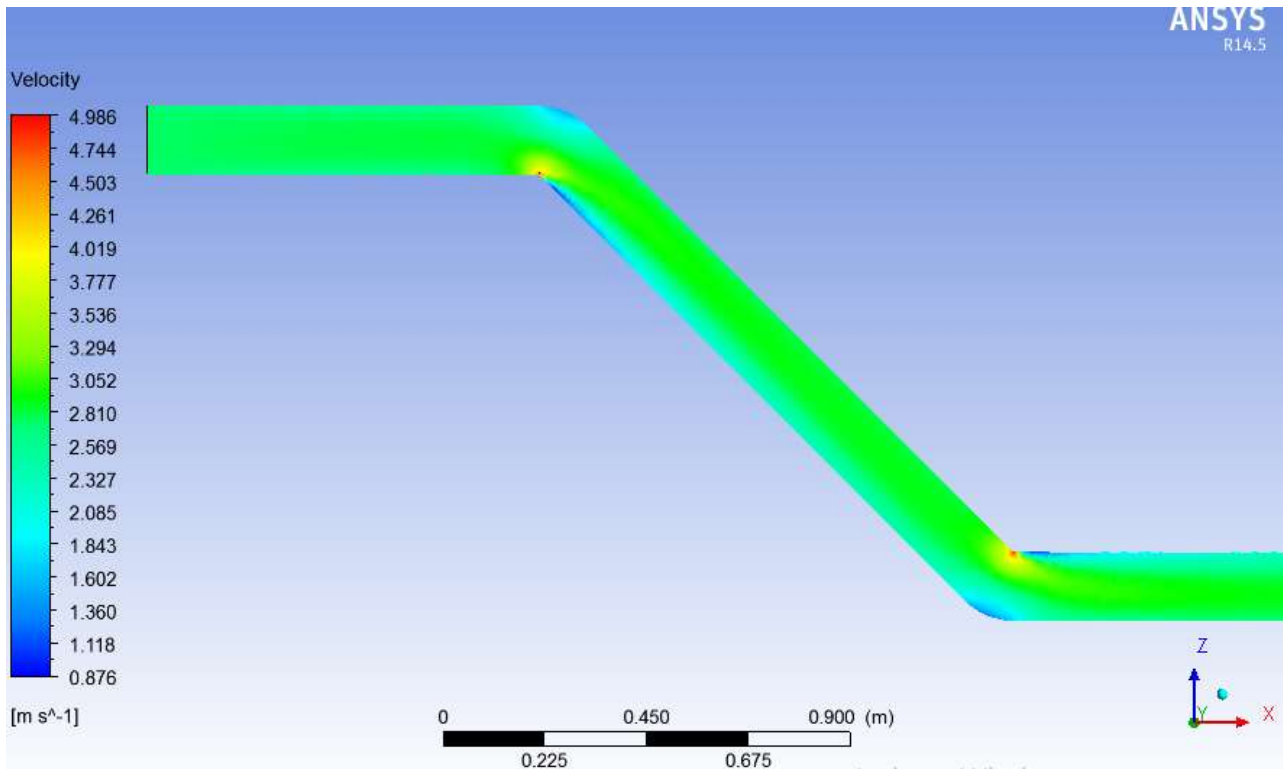
Temperatur operasional fluida (°F) = 124,22



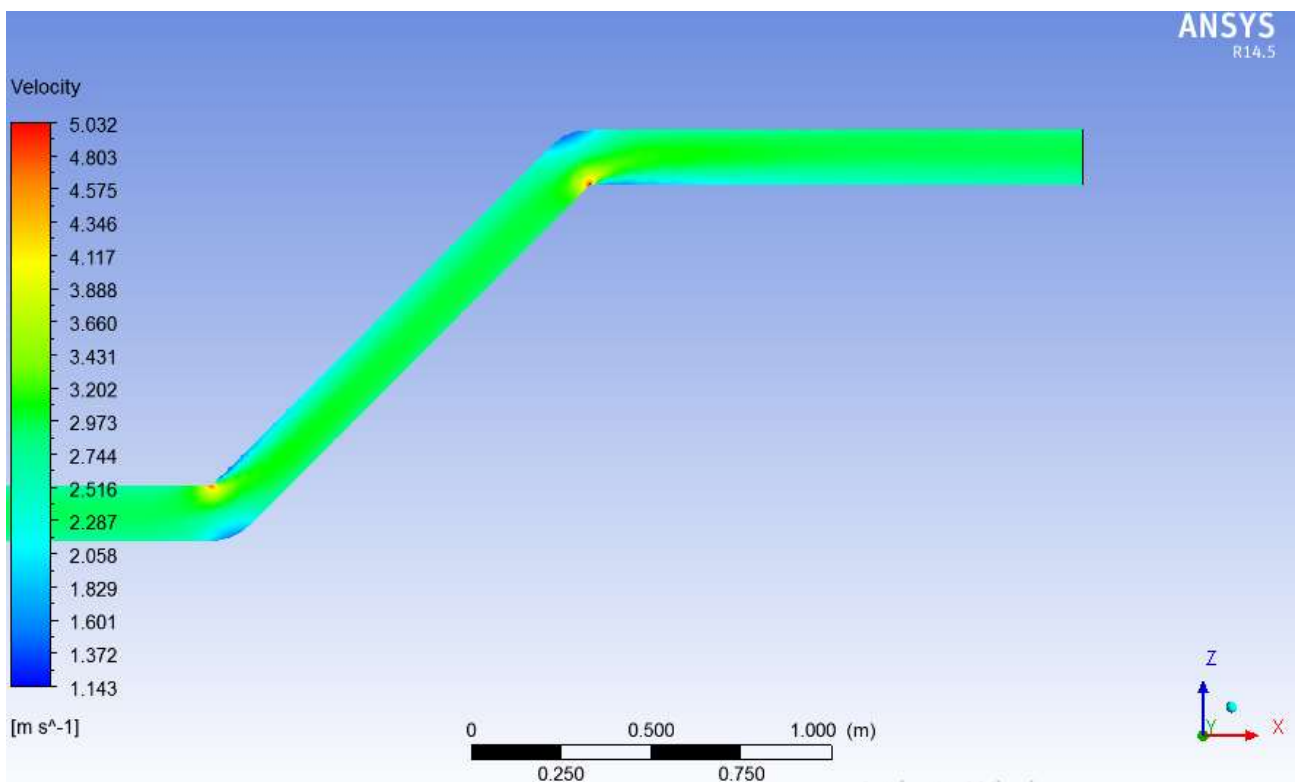
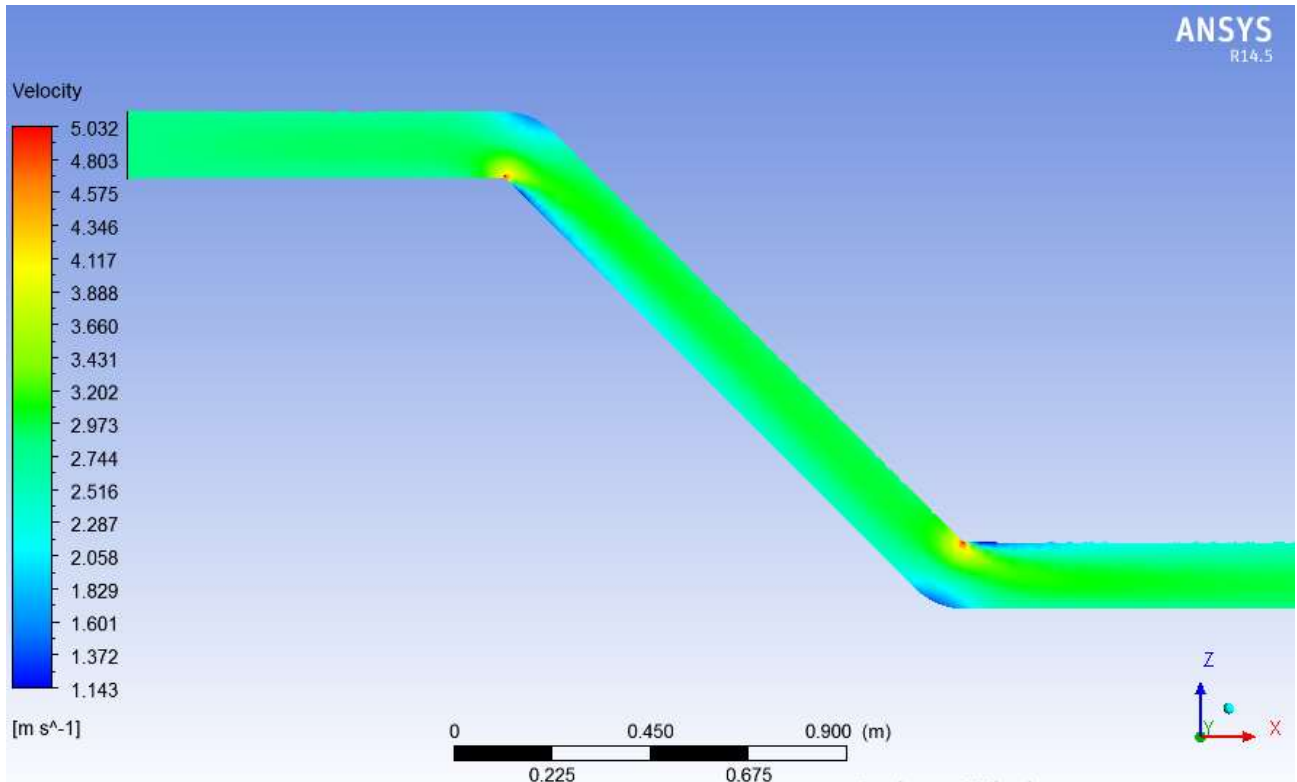
Kecepatan rata-rata fluida (ft/s) = 8,20
Tekanan operasional fluida (psi) = 2734
Temperatur operasional fluida (°F) = 127,11



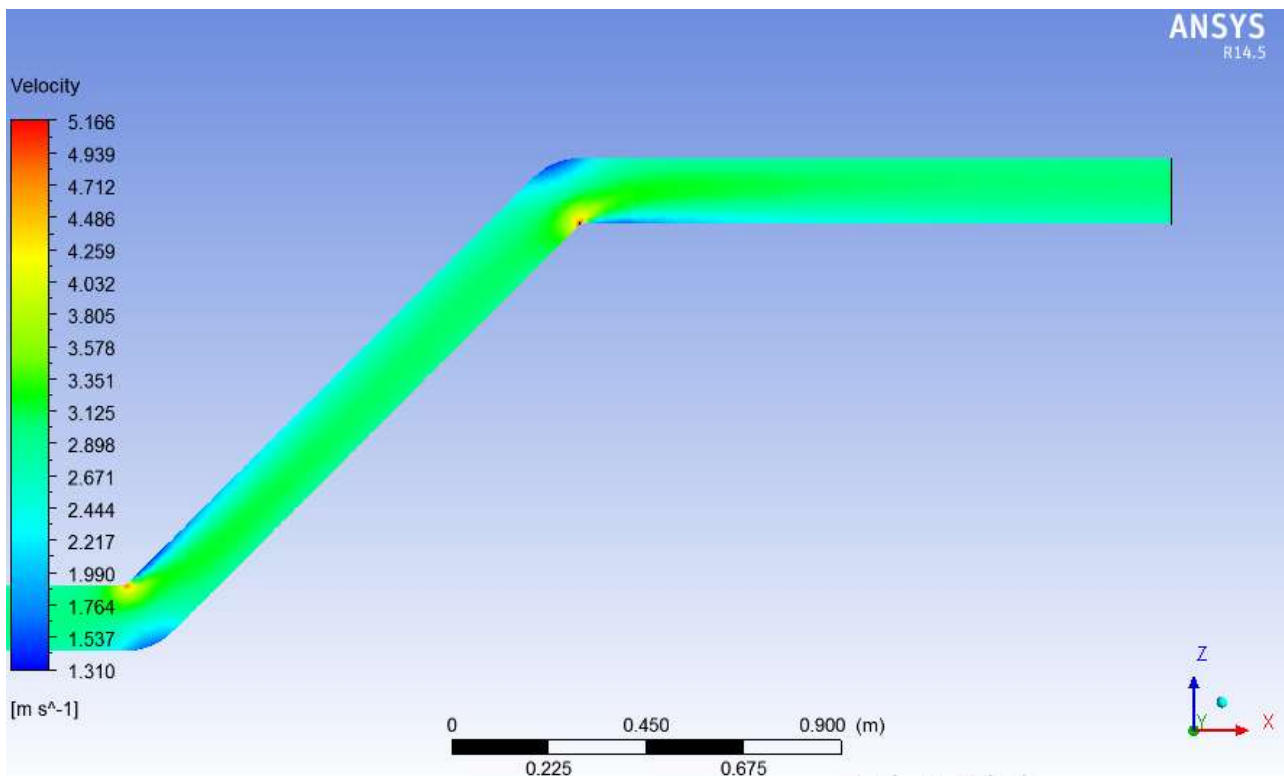
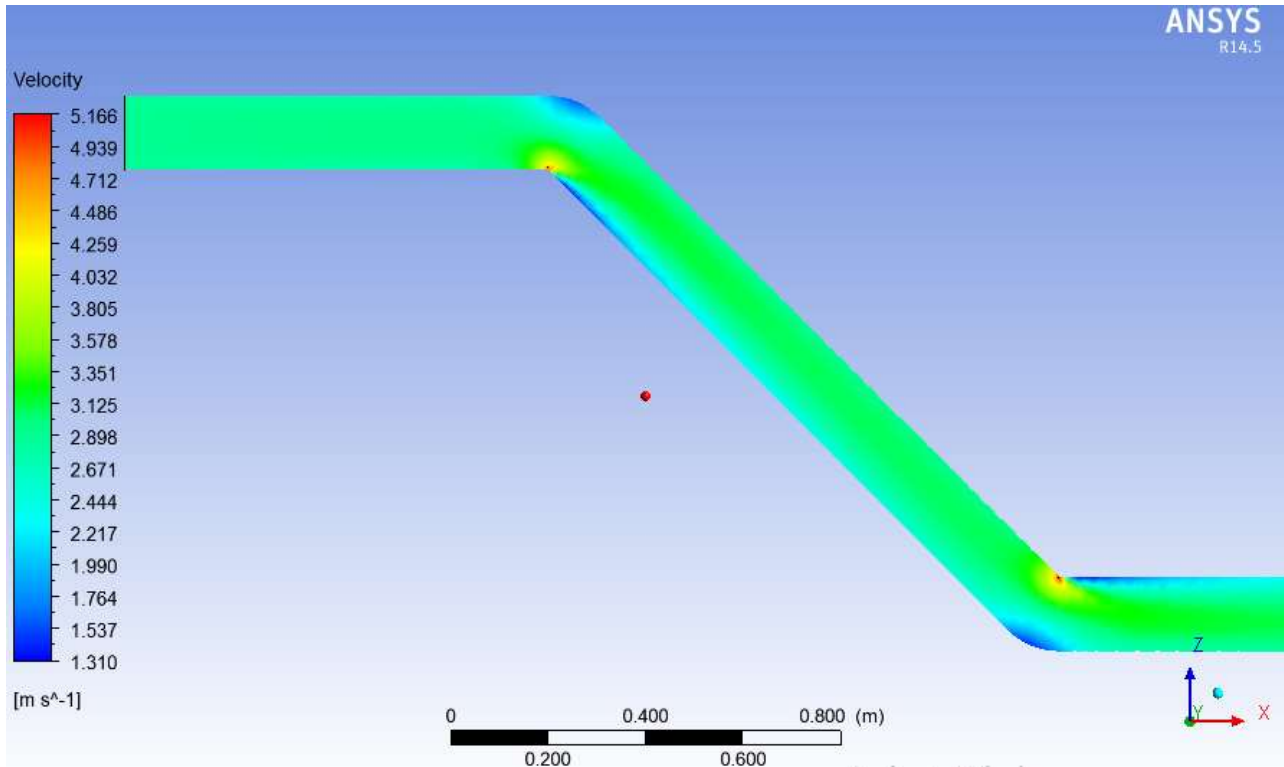
Kecepatan rata-rata fluida (ft/s) = 9,01
Tekanan operasional fluida (psi) = 2809
Temperatur operasional fluida (°F) = 127,76



Kecepatan rata-rata fluida (ft/s) = 9,34
Tekanan operasional fluida (psi) = 2856
Temperatur operasional fluida (°F) = 131,09



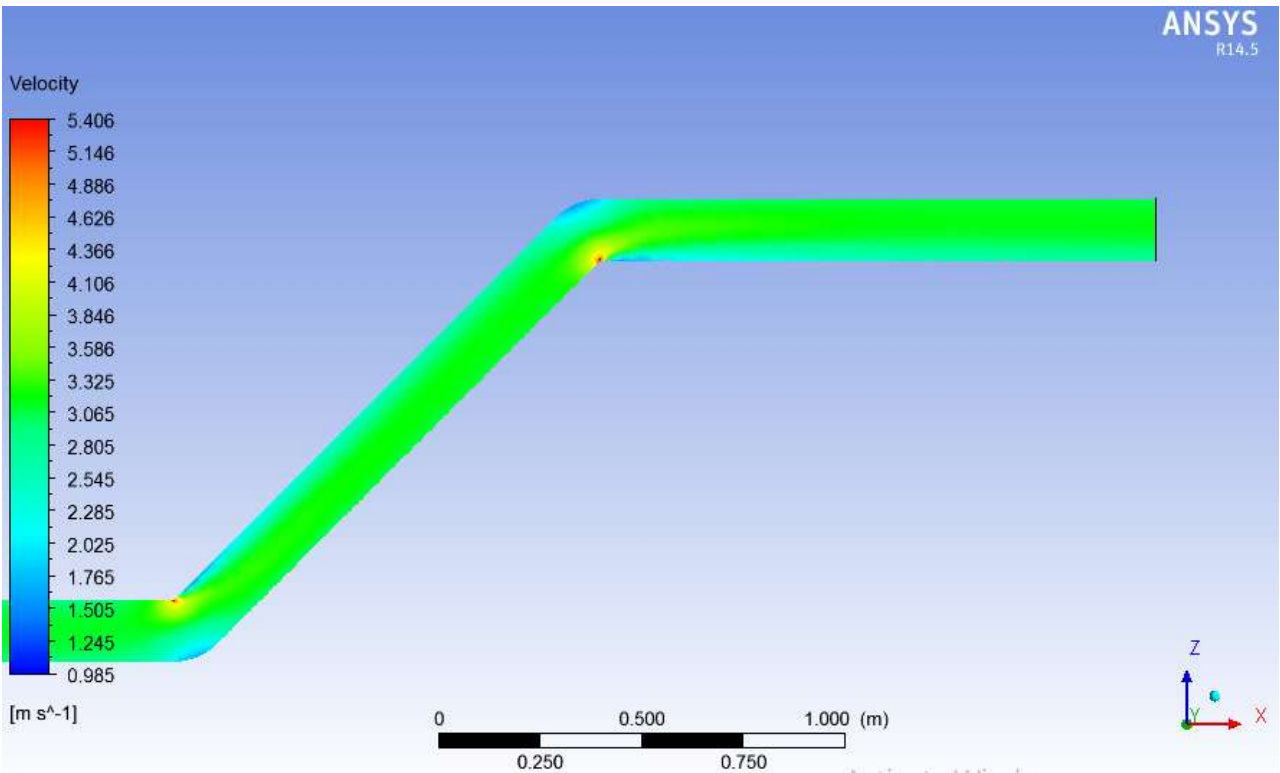
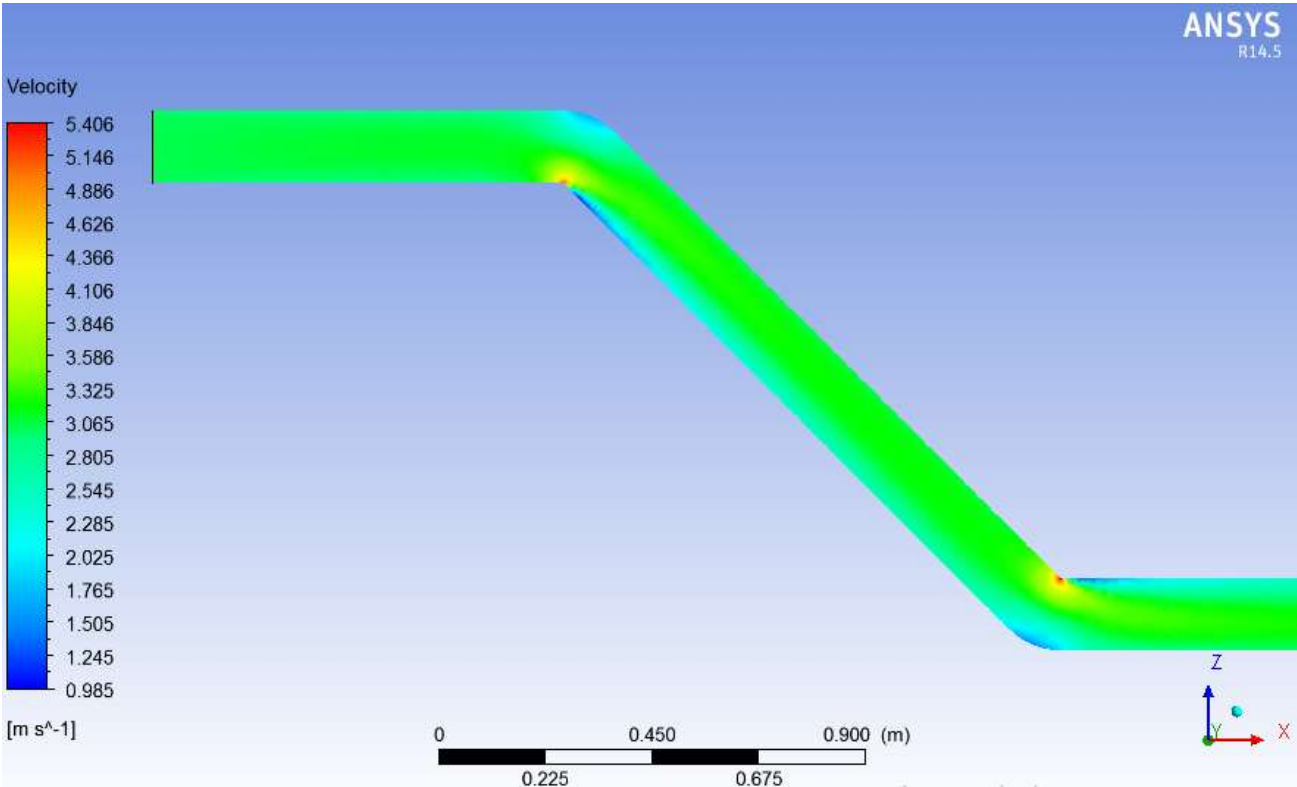
Kecepatan rata-rata fluida (ft/s) = 9,56
Tekanan operasional fluida (psi) = 2901
Temperatur operasional fluida (°F) = 131,73



Kecepatan rata-rata fluida (ft/s) = 9,97

Tekanan operasional fluida (psi) = 2955

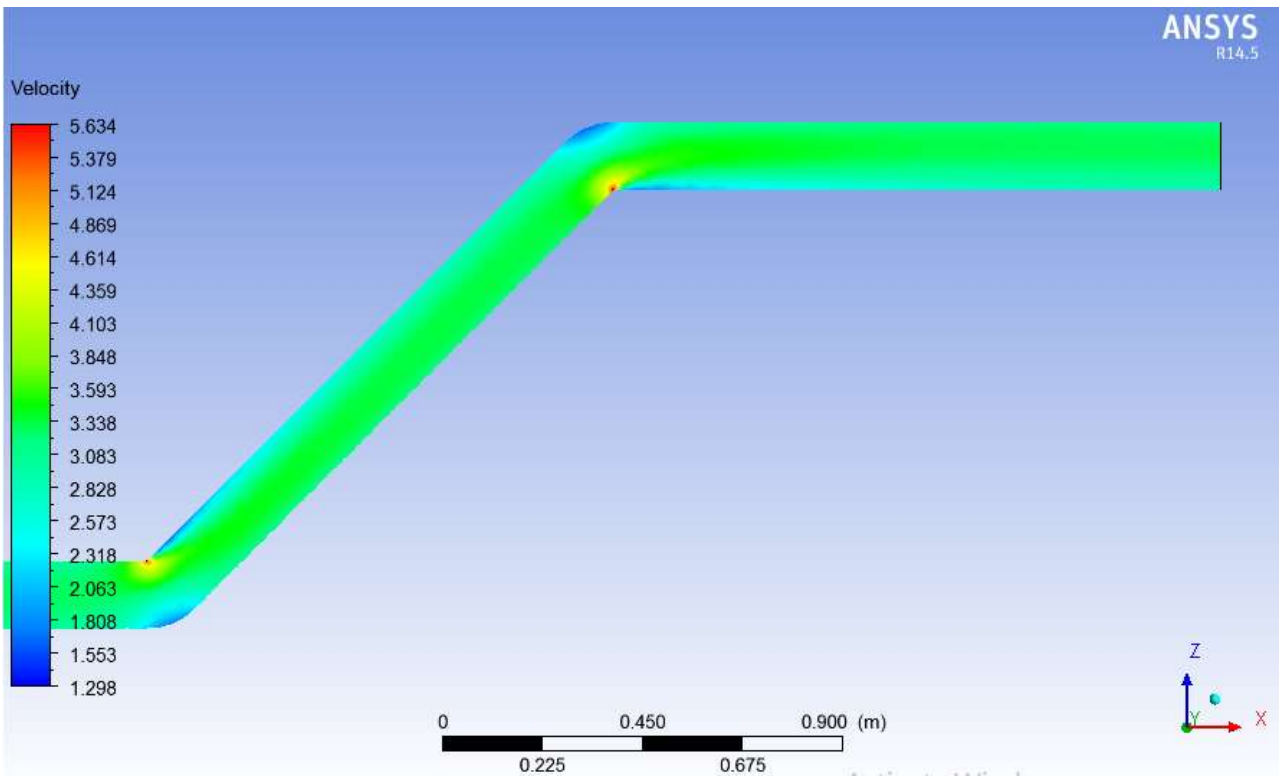
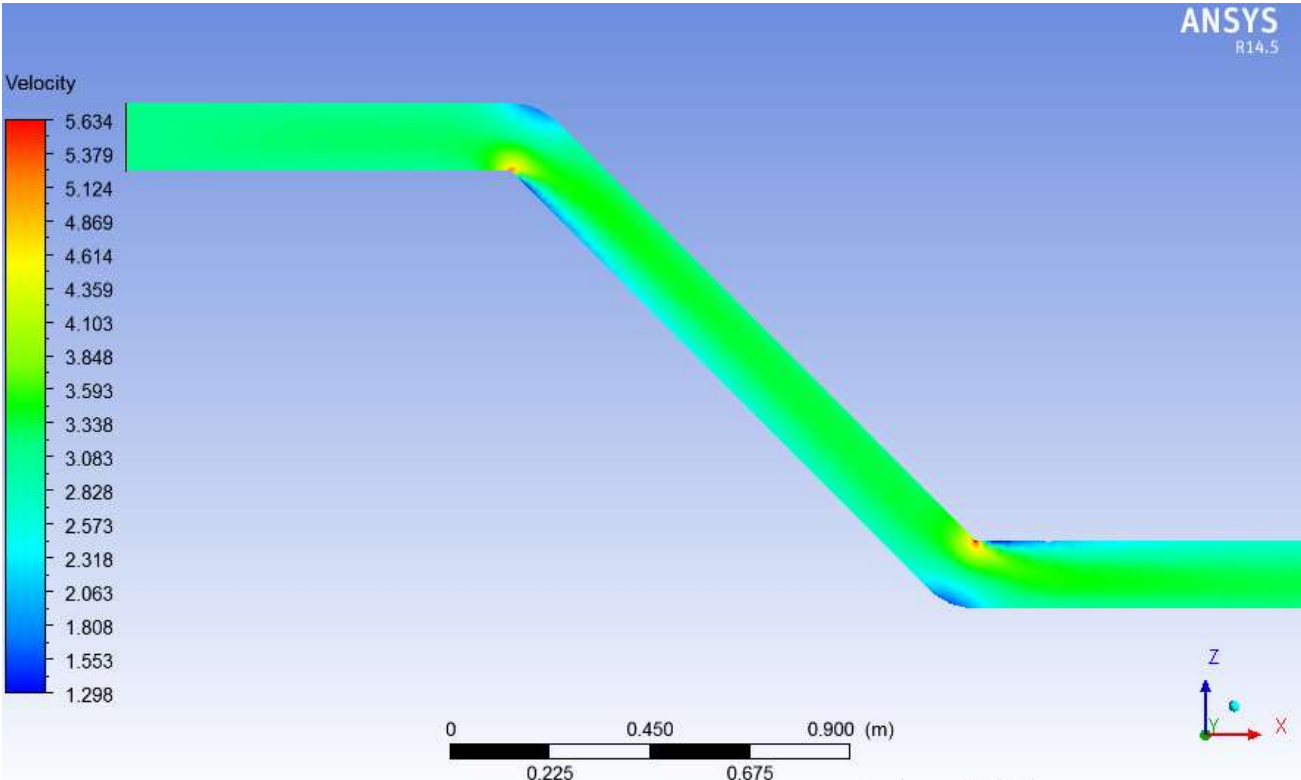
Temperatur operasional fluida (°F) = 133,39



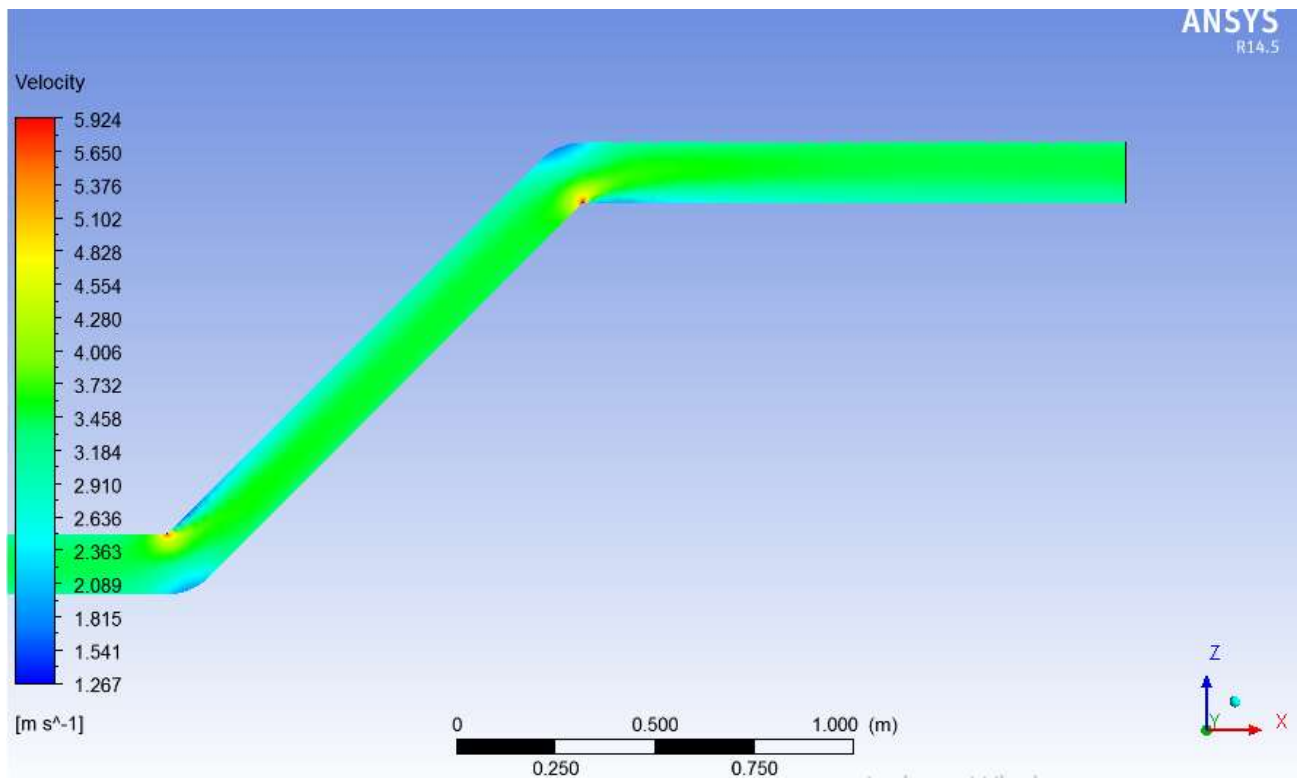
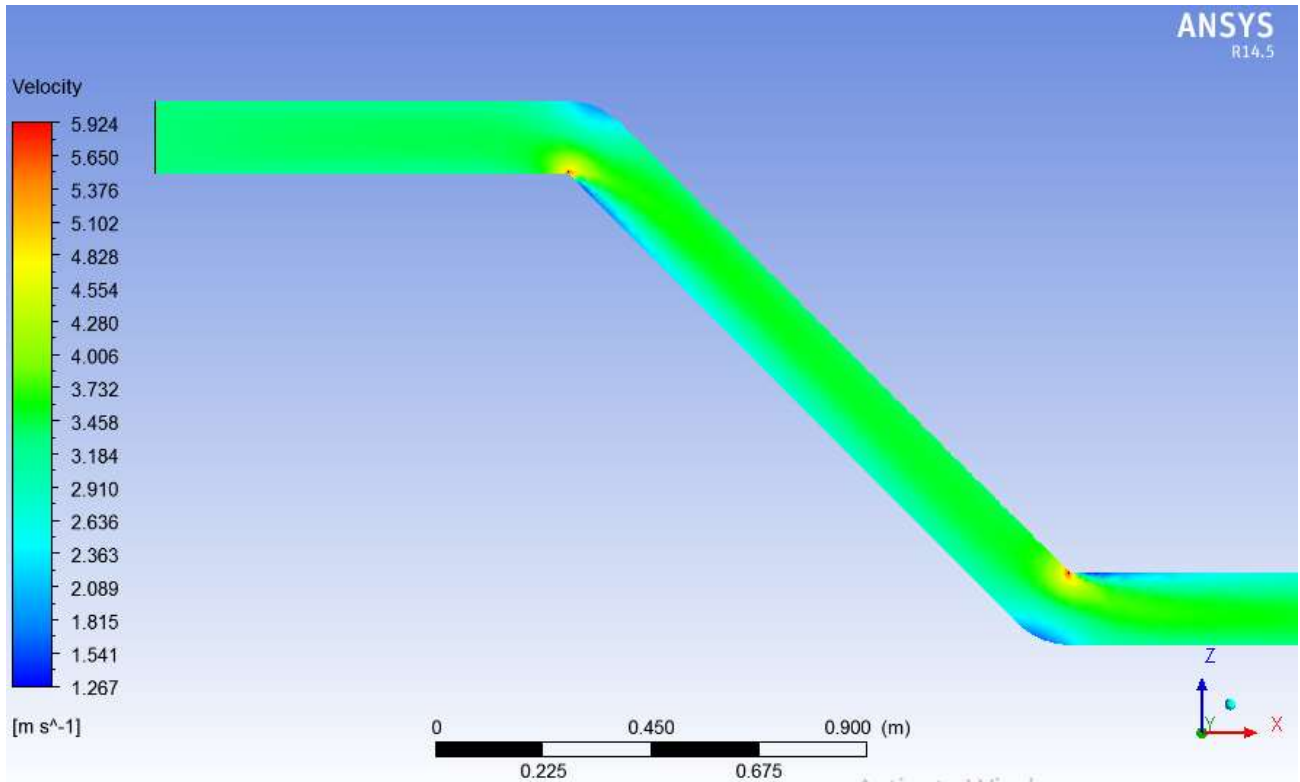
Kecepatan rata-rata fluida (ft/s) = 10,45

Tekanan operasional fluida (psi) = 3025

Temperatur operasional fluida (°F) = 133,52



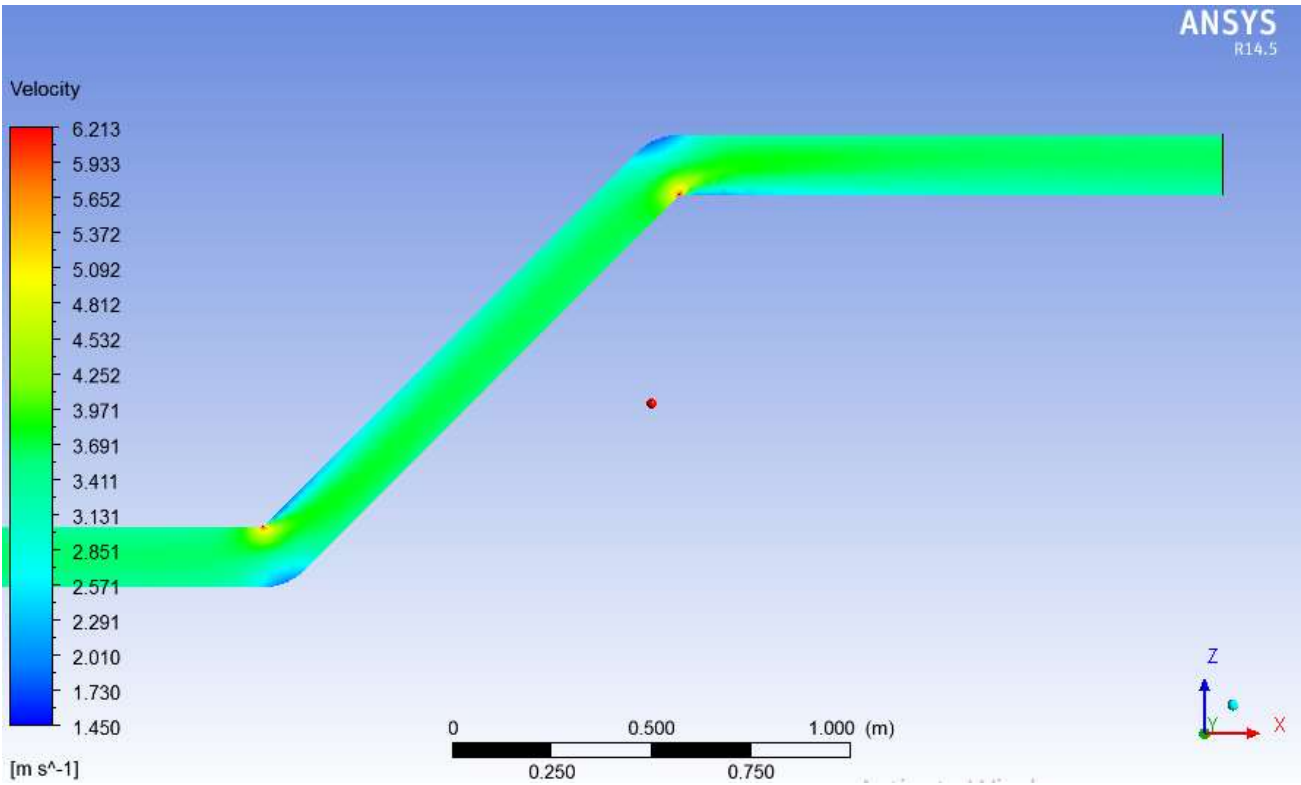
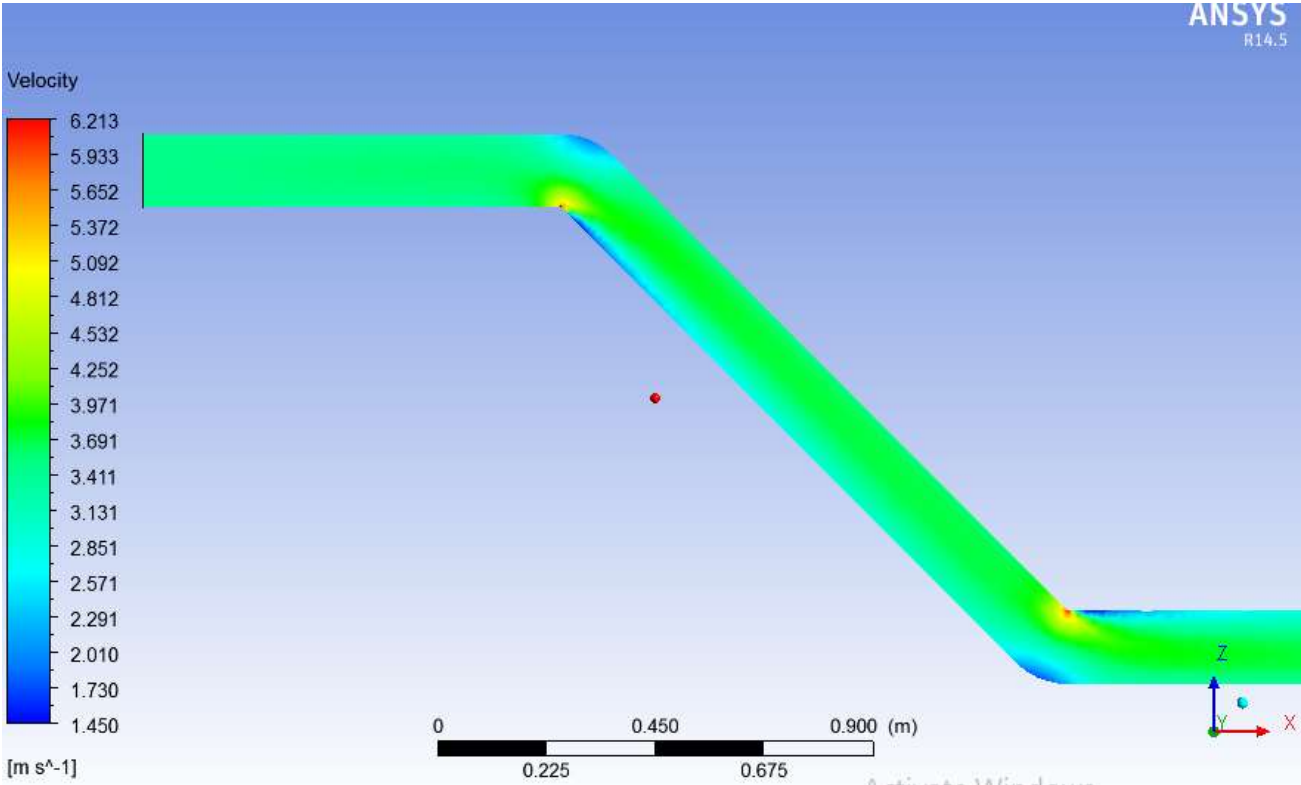
Kecepatan rata-rata fluida (ft/s) = 10,98
Tekanan operasional fluida (psi) = 3114
Temperatur operasional fluida (°F) = 135,75



Kecepatan rata-rata fluida (ft/s) = 11,49

Tekanan operasional fluida (psi) = 3236

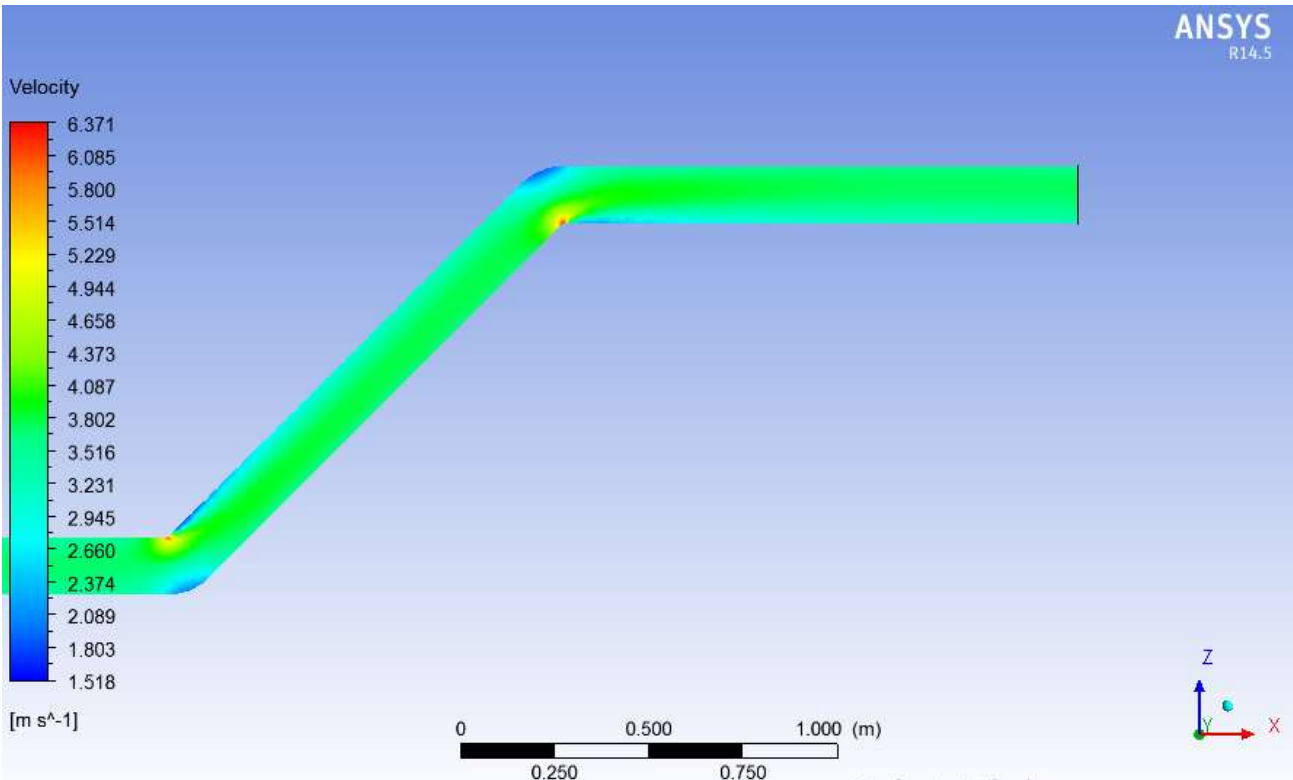
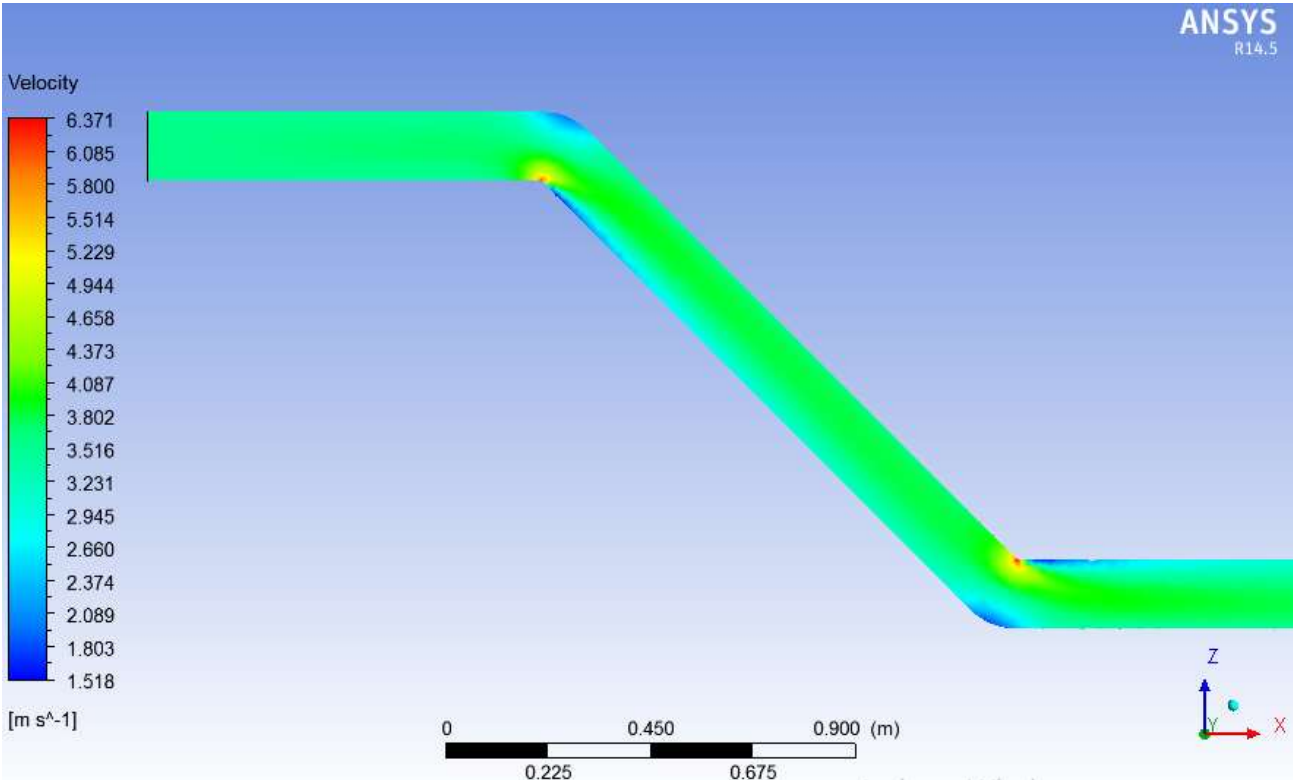
Temperatur operasional fluida (°F) = 139,14



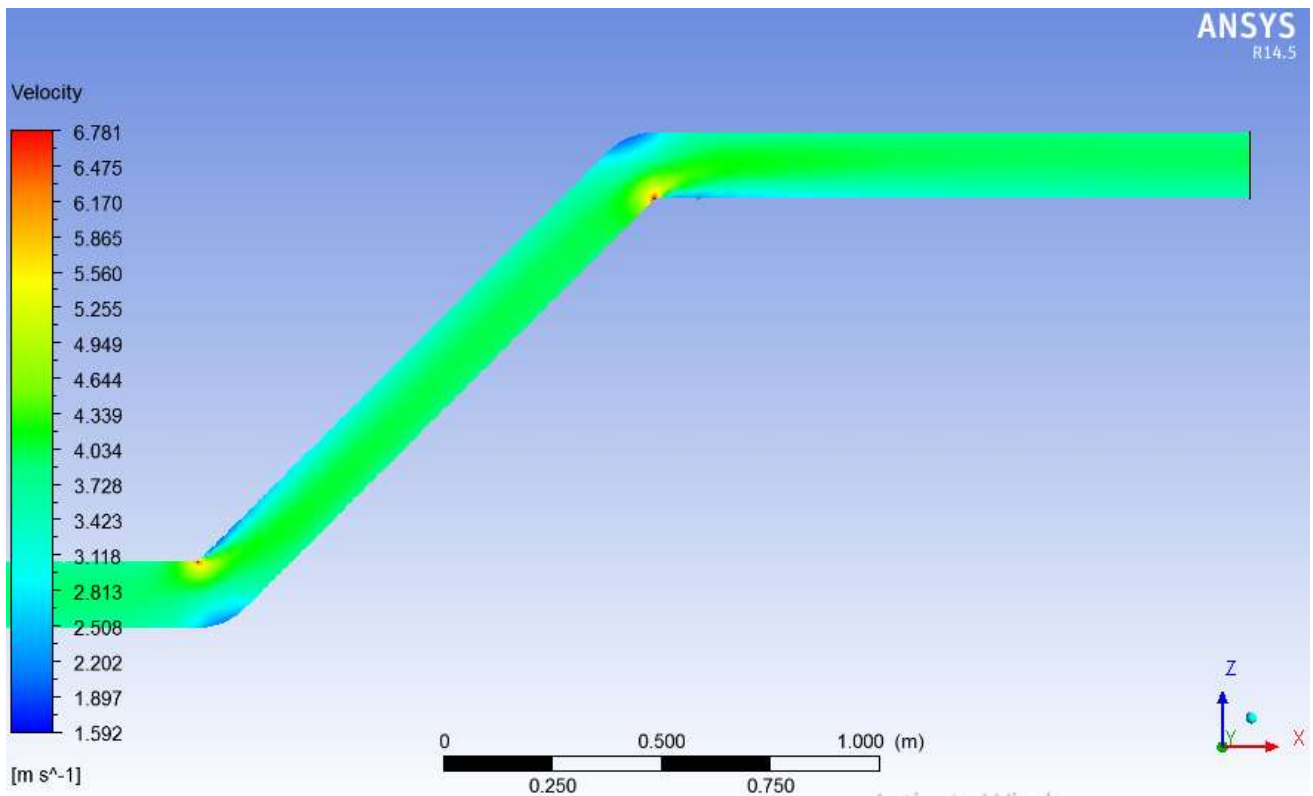
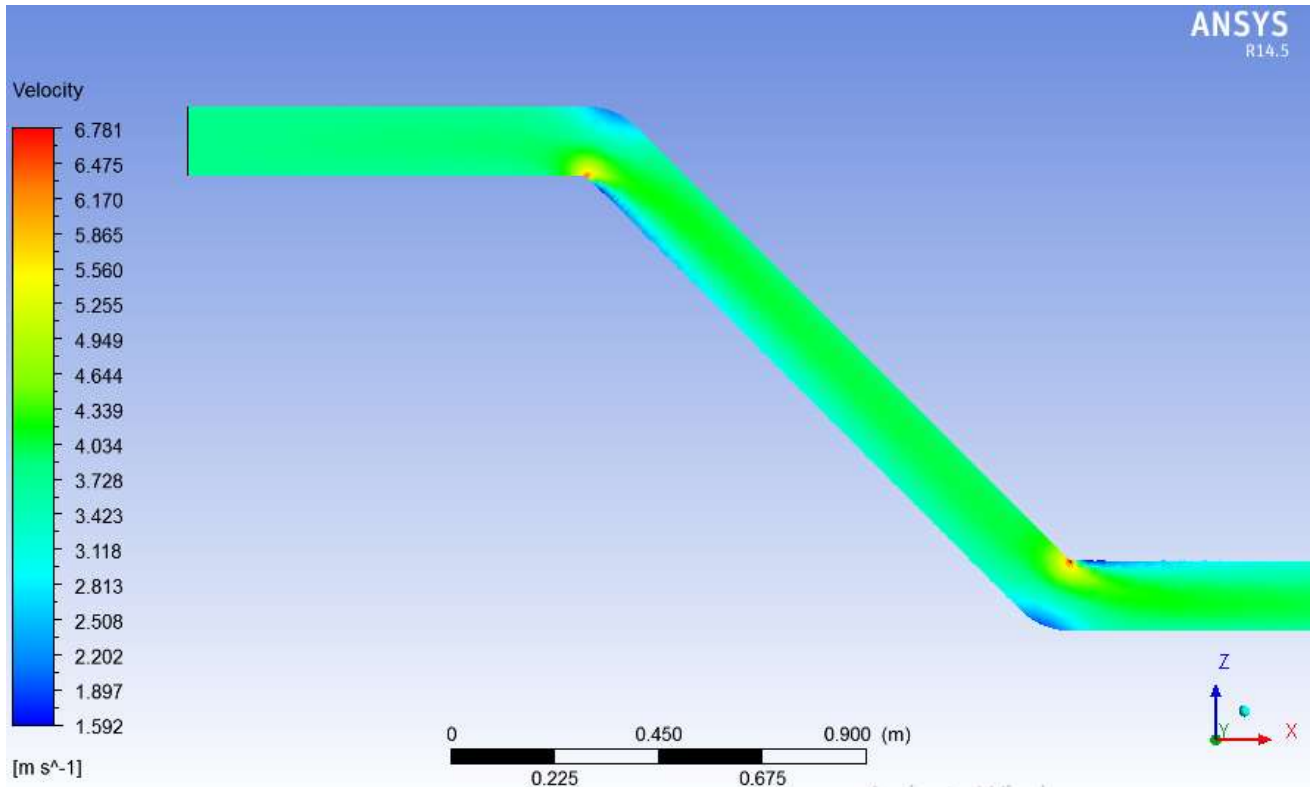
Kecepatan rata-rata fluida (ft/s) = 11,83

Tekanan operasional fluida (psi) = 3321

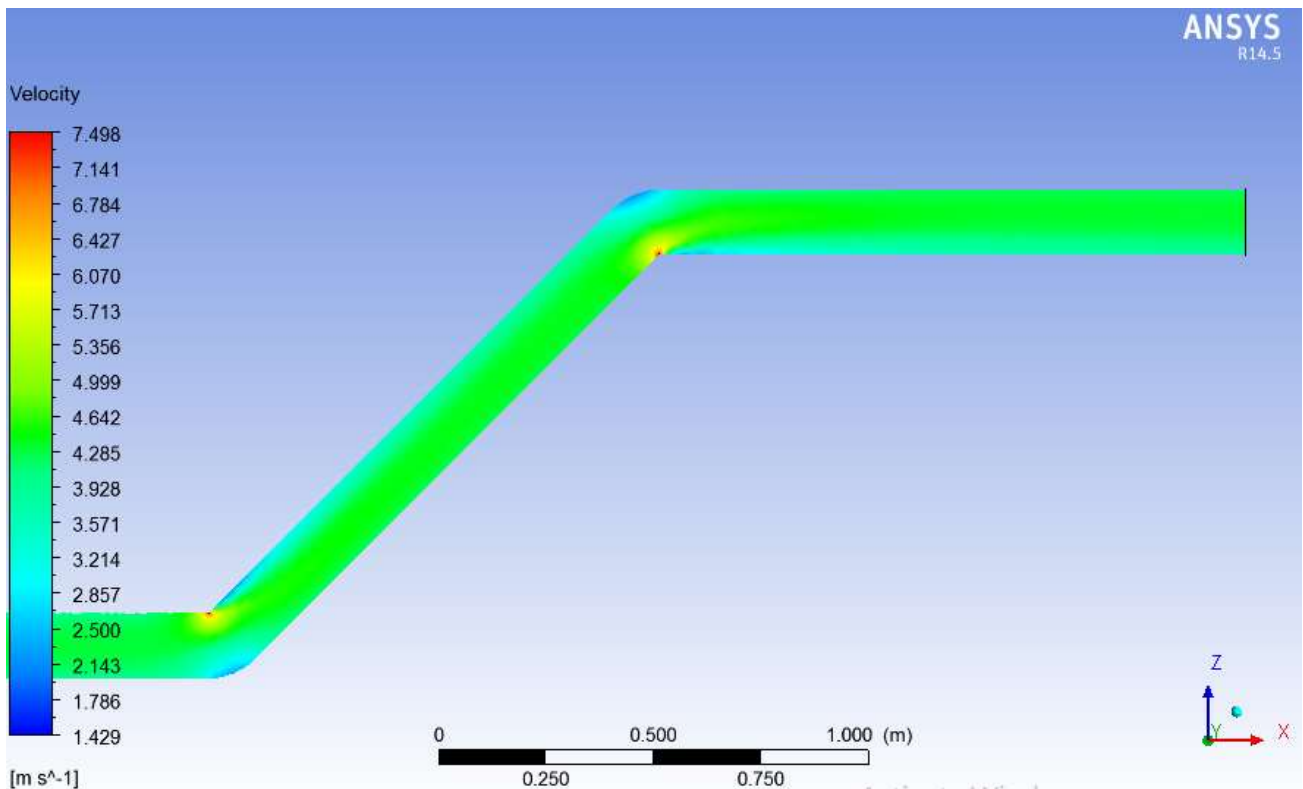
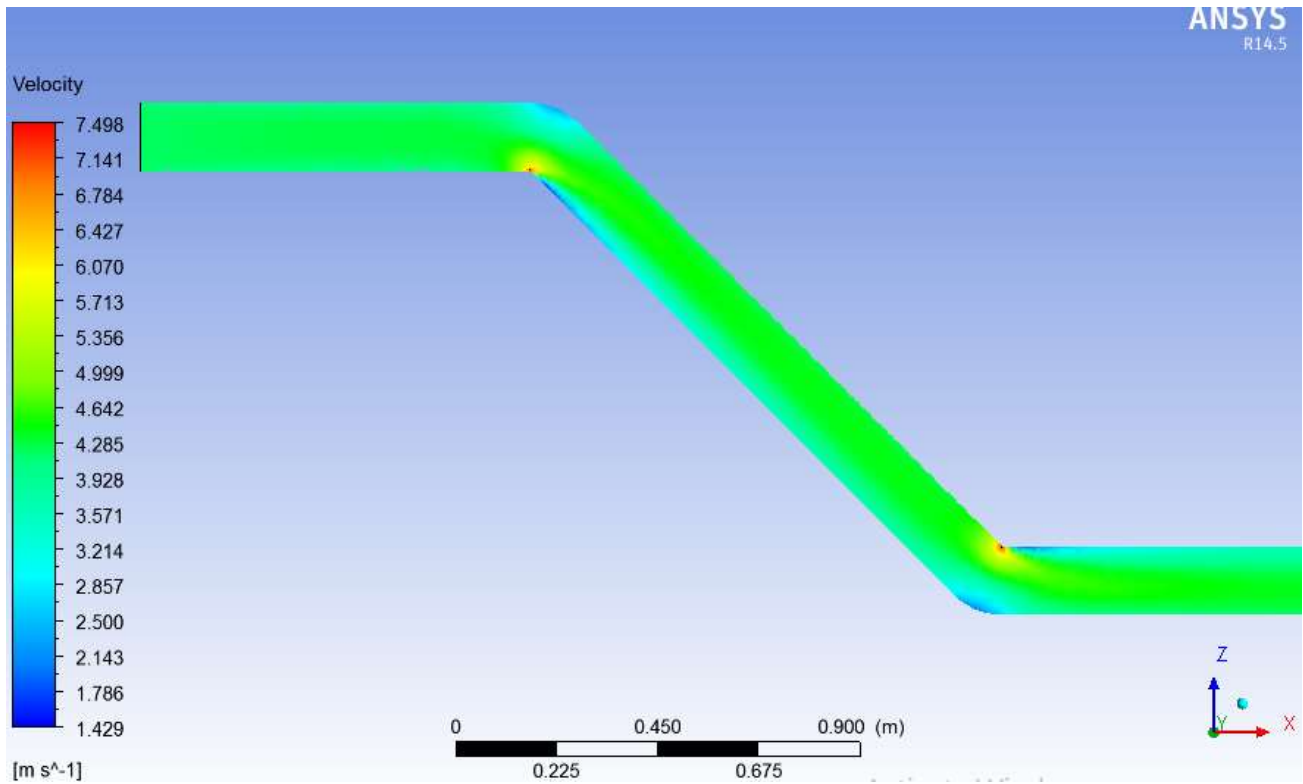
Temperatur operasional fluida (°F) = 141,46



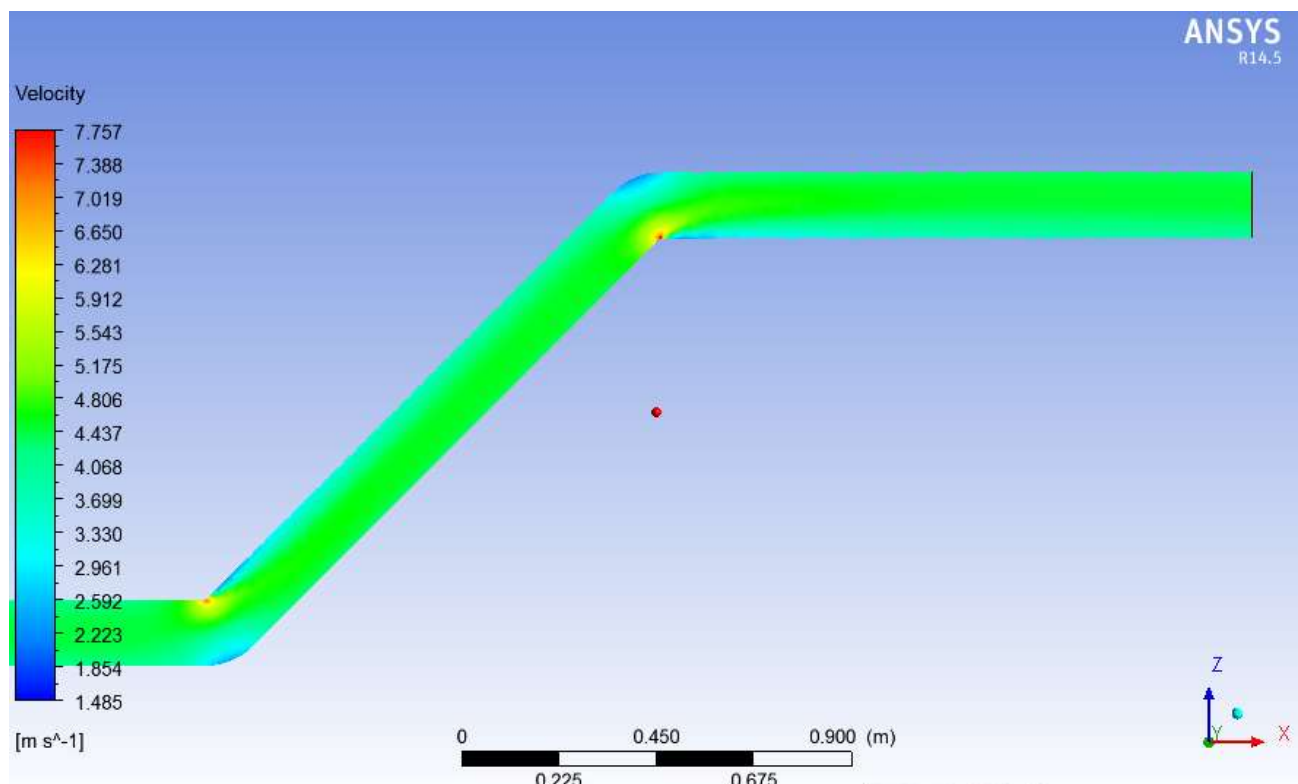
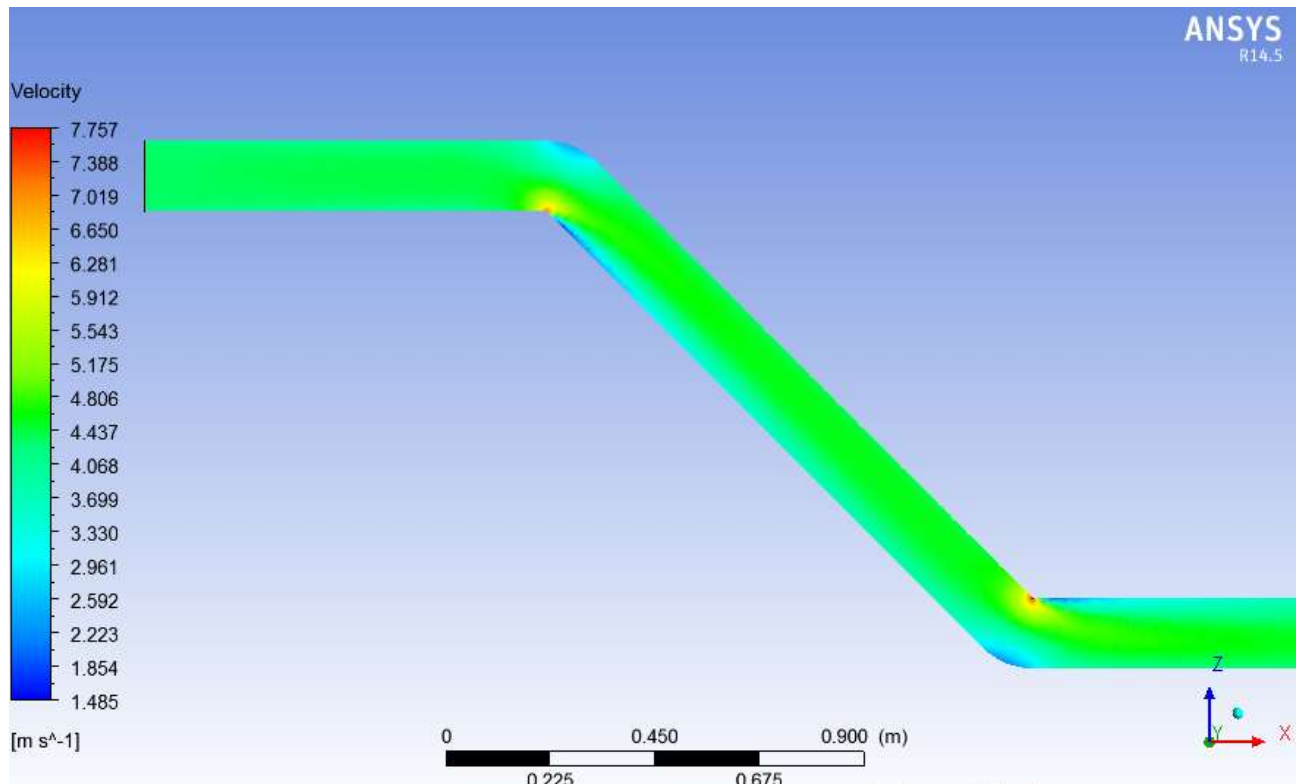
Kecepatan rata-rata fluida (ft/s) = 12,55
Tekanan operasional fluida (psi) = 3375
Temperatur operasional fluida (°F) = 143,86



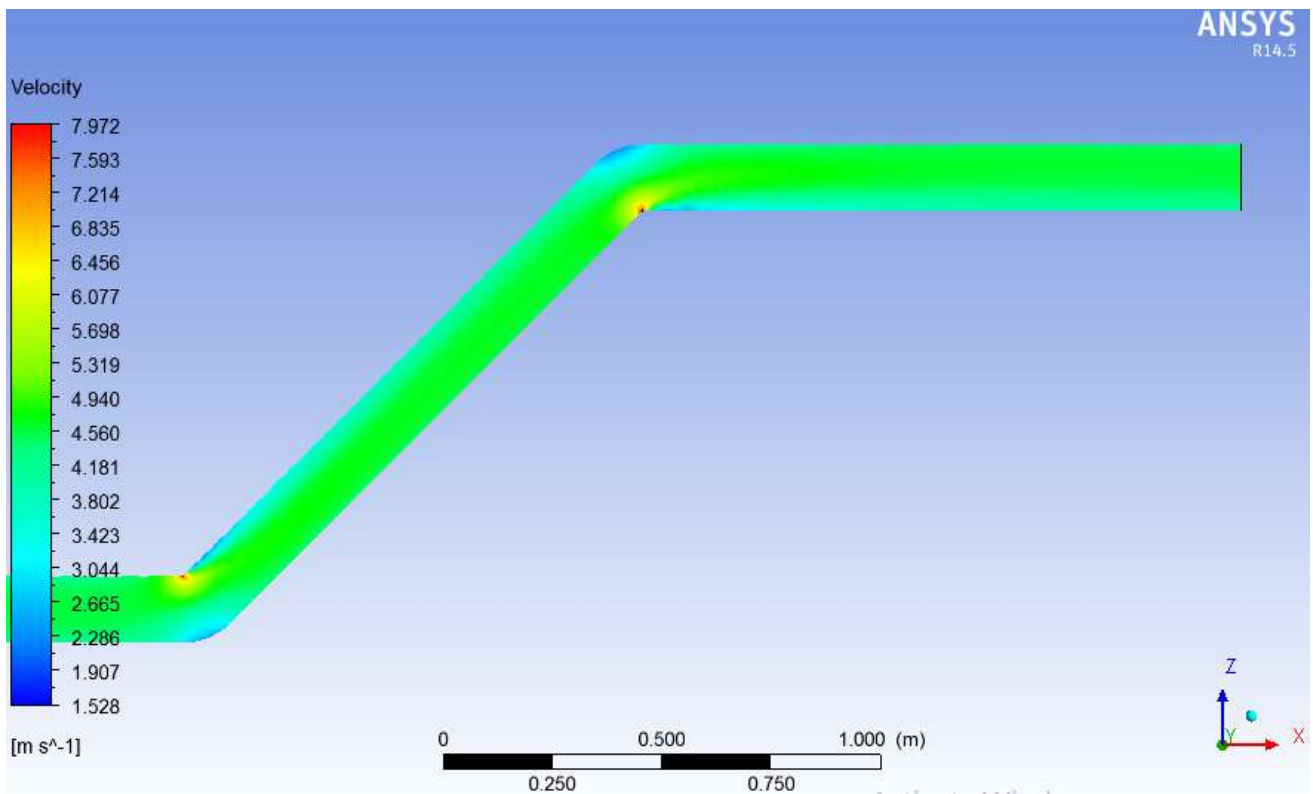
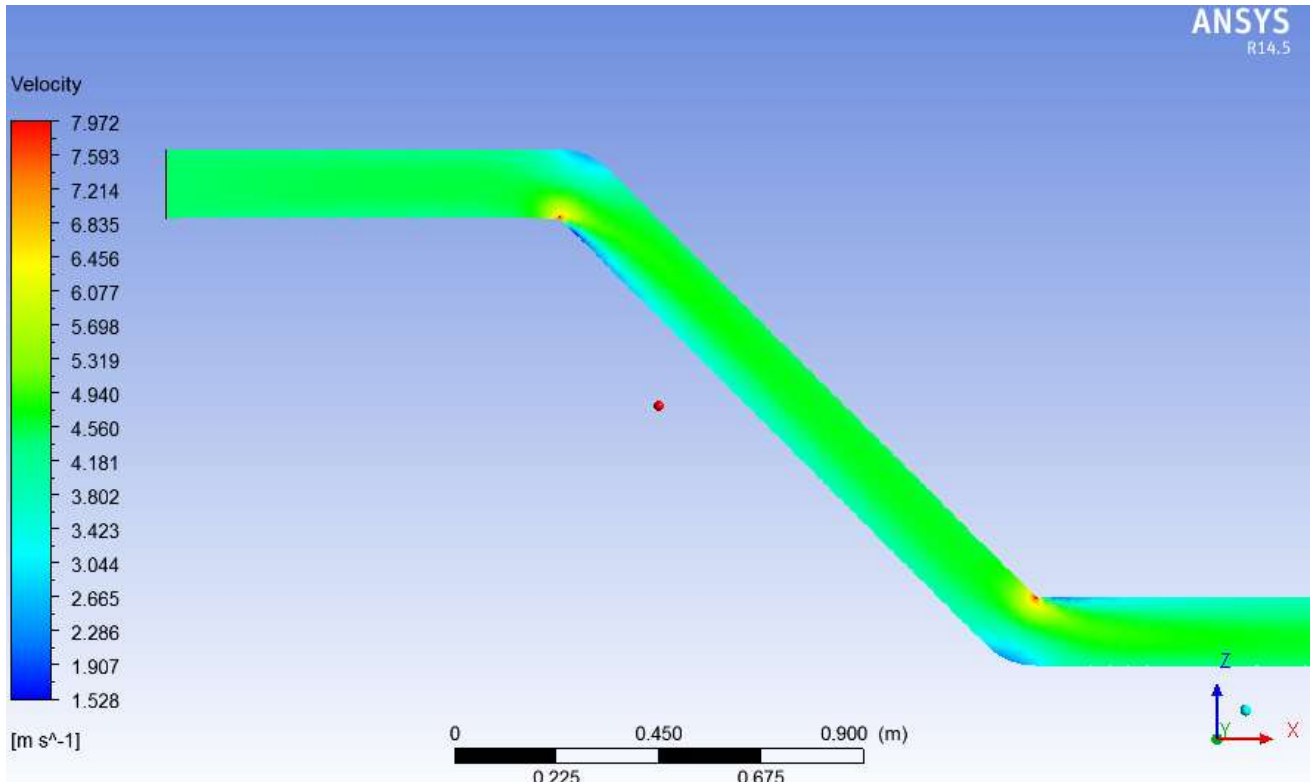
Kecepatan rata-rata fluida (ft/s) = 13,79
Tekanan operasional fluida (psi) = 3420
Temperatur operasional fluida (°F) = 144,15



Kecepatan rata-rata fluida (ft/s) = 14,24
Tekanan operasional fluida (psi) = 3445
Temperatur operasional fluida (°F) = 145,22



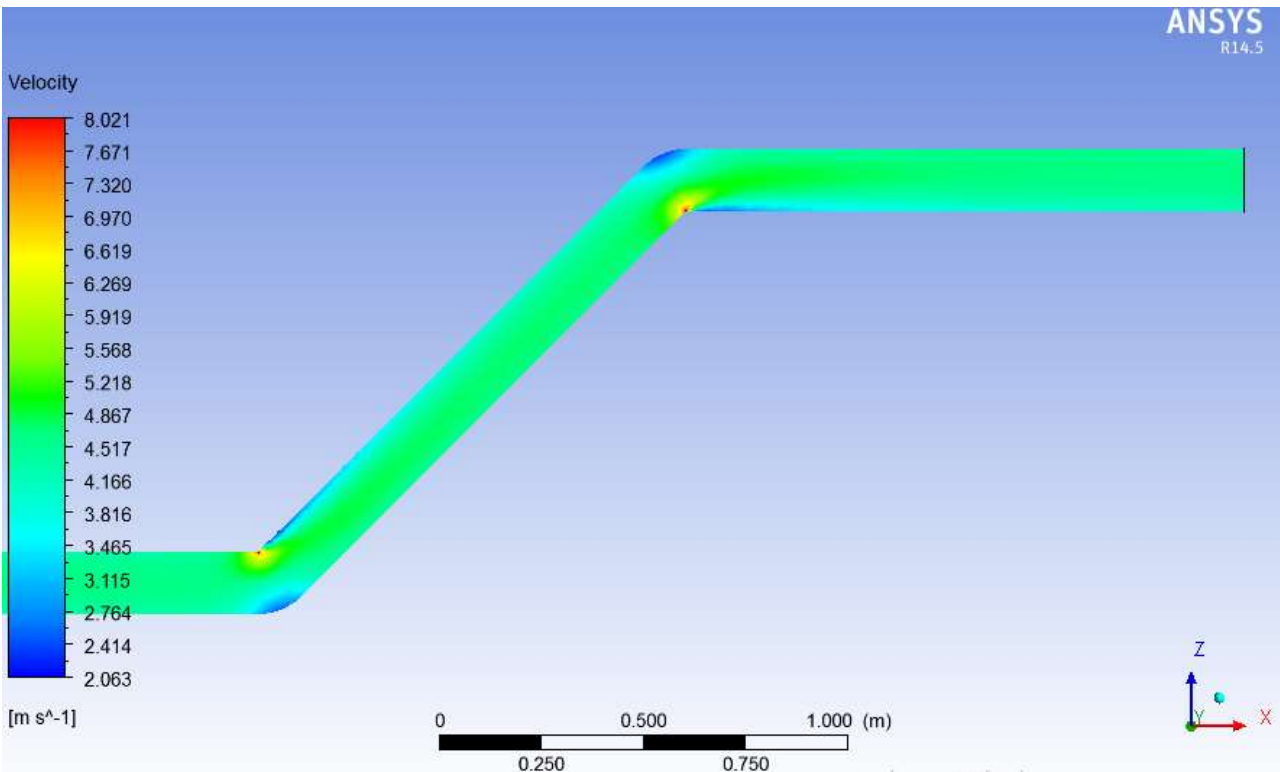
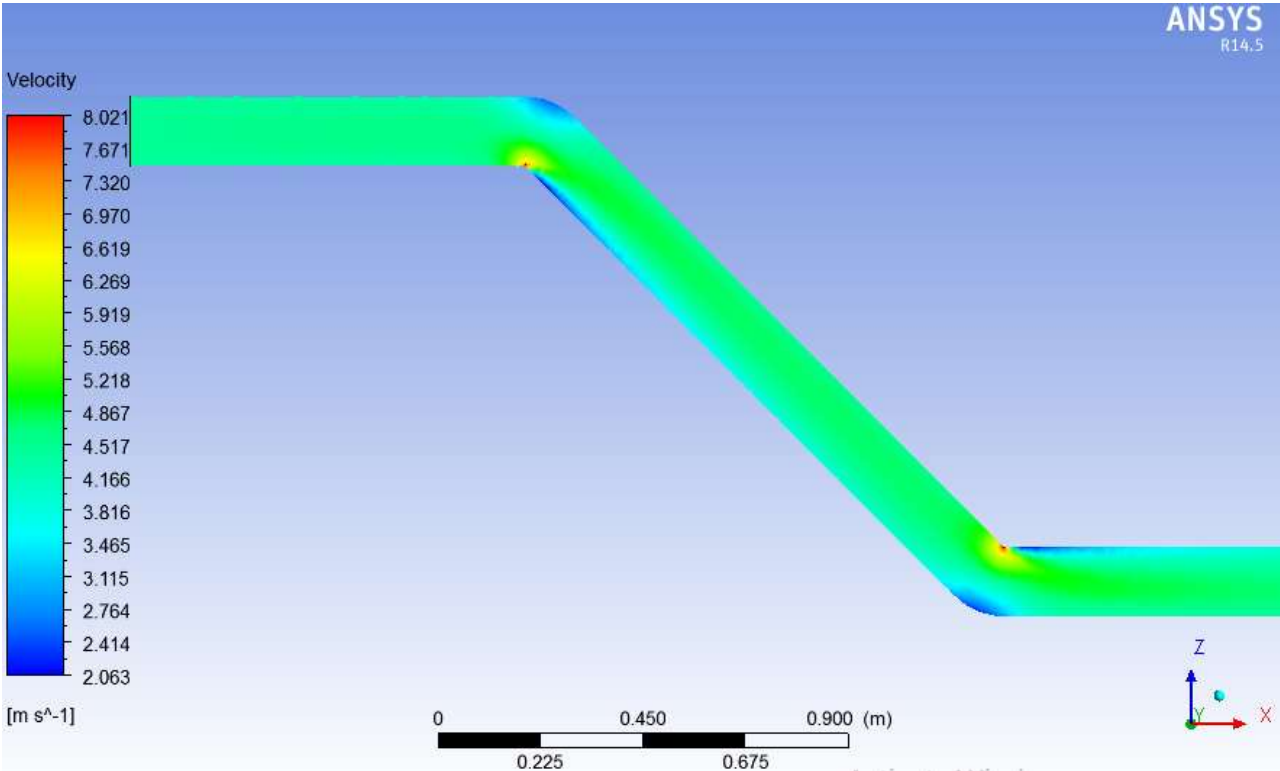
Kecepatan rata-rata fluida (ft/s) = 14,63
Tekanan operasional fluida (psi) = 3468
Temperatur operasional fluida (°F) = 146,28



Kecepatan rata-rata fluida (ft/s) = 14,85

Tekanan operasional fluida (psi) = 3500

Temperatur operasional fluida (°F) = 150



Lampiran B

Simulasi Montecarlo

Equivalent Stress

Elbow Section 1

No	Tekanan Operasional, Pi (psi)	External Pressure, Pe (psi)	Diameter Luar (in)	t (in)	Poisson's Ratio	Internal Bore Area, Ai (in ²)	Eksternal area of pipe, Ae (in ²)	Pipe cross section area, As (in ²)	Modulus Young (psi)	Temperature of pipe, Ta (°F)	Ambient Temperature, Ta (°F)	Thermal expansion coefficient (α)	Hoop Stress (psi)	Longitudinal stress (psi)	Equivalent Stress (psi)
1	2400	14,69	6	0,280	0,3	23,23	28,26	5,03	3,0E+07	110,00	80,6	7,3E-06	24384,55	10844,24	21160,63
2	2420	14,69	6	0,280	0,3	23,24	28,26	5,02	3,0E+07	113,68	80,6	7,3E-06	24593,71	11687,17	21307,50
3	2478	14,69	6	0,280	0,3	23,24	28,26	5,02	3,0E+07	114,99	80,6	7,3E-06	25193,55	12084,53	21824,27
4	2512	14,69	6	0,279	0,3	23,24	28,26	5,02	3,0E+07	115,77	80,6	7,3E-06	25564,84	12322,50	22144,57
5	2580	14,69	6	0,279	0,3	23,24	28,26	5,02	3,0E+07	116,19	80,6	7,3E-06	26274,69	12543,47	22762,29
6	2686	14,69	6	0,279	0,3	23,25	28,26	5,01	3,0E+07	124,22	80,6	7,3E-06	27418,39	14509,43	23758,50
7	2734	14,69	6	0,278	0,3	23,26	28,26	5,00	3,0E+07	127,11	80,6	7,3E-06	27950,91	15239,22	24239,17
8	2809	14,69	6	0,278	0,3	23,27	28,26	4,99	3,0E+07	127,76	80,6	7,3E-06	28757,60	15527,33	24931,28
9	2856	14,69	6	0,278	0,3	23,27	28,26	4,99	3,0E+07	131,09	80,6	7,3E-06	29259,94	16348,08	25398,03
10	2901	14,69	6	0,278	0,3	23,27	28,26	4,99	3,0E+07	131,73	80,6	7,3E-06	29737,75	16575,02	25810,10
11	2955	14,69	6	0,278	0,3	23,27	28,26	4,99	3,0E+07	133,39	80,6	7,3E-06	30315,32	17043,38	26321,47
12	3025	14,69	6	0,277	0,3	23,28	28,26	4,98	3,0E+07	133,52	80,6	7,3E-06	31065,07	17208,95	26955,32
13	3114	14,69	6	0,277	0,3	23,28	28,26	4,98	3,0E+07	135,75	80,6	7,3E-06	32017,17	17871,35	27790,18
14	3236	14,69	6	0,277	0,3	23,29	28,26	4,97	3,0E+07	139,14	80,6	7,3E-06	33337,40	18852,23	28953,49
15	3321	14,69	6	0,276	0,3	23,29	28,26	4,97	3,0E+07	141,46	80,6	7,3E-06	34240,49	19525,94	29750,56
16	3375	14,69	6	0,276	0,3	23,30	28,26	4,96	3,0E+07	143,86	80,6	7,3E-06	34838,19	20159,37	30294,94
17	3420	14,69	6	0,275	0,3	23,31	28,26	4,95	3,0E+07	144,15	80,6	7,3E-06	35397,52	20325,37	30767,48
18	3445	14,69	6	0,275	0,3	23,32	28,26	4,94	3,0E+07	145,22	80,6	7,3E-06	35711,70	20617,94	31050,33
19	3468	14,69	6	0,275	0,3	23,32	28,26	4,94	3,0E+07	146,28	80,6	7,3E-06	35990,00	20902,83	31303,60
20	3500	14,69	6	0,274	0,3	23,33	28,26	4,93	3,0E+07	150,00	80,6	7,3E-06	36367,18	21785,80	31700,24

Equivalent Stress

Elbow Section 2

No	Tekanan Operasional, Pi (psi)	Tekanan Eksternal, Pe (psi)	Diameter Luar (in)	t (in)	Poisson's Ratio	Internal Bore Area, Ai (in ²)	Eksternal area of pipe, Ae (in ²)	Pipe cross section area, As (in ²)	Modulus Young (psi)	Temperature of pipe, Ta (°F)	Ambient Temperature, Ta (°F)	Thermal expansion coefficient (α)	Hoop Stress (psi)	Longitudinal stress (psi)	Equivalent Stress (psi)
1	2400	14,69	6	0,2797	0,3	23,24	28,26	5,025	3,0E+07	110,00	80,6	7,3E-06	24387,98	10844,92	21163,65
2	2420	14,69	6	0,2797	0,3	23,24	28,26	5,024	3,0E+07	113,68	80,6	7,3E-06	24598,05	11688,03	21311,30
3	2478	14,69	6	0,2796	0,3	23,24	28,26	5,022	3,0E+07	114,99	80,6	7,3E-06	25198,93	12085,60	21828,96
4	2512	14,69	6	0,2793	0,3	23,24	28,26	5,017	3,0E+07	115,77	80,6	7,3E-06	25574,29	12324,39	22152,82
5	2580	14,69	6	0,2791	0,3	23,25	28,26	5,013	3,0E+07	116,19	80,6	7,3E-06	26292,54	12547,03	22777,89
6	2686	14,69	6	0,2784	0,3	23,26	28,26	5,002	3,0E+07	124,22	80,6	7,3E-06	27447,68	14515,27	23783,56
7	2734	14,69	6	0,2781	0,3	23,26	28,26	4,996	3,0E+07	127,11	80,6	7,3E-06	27979,68	15244,96	24263,60
8	2809	14,69	6	0,2775	0,3	23,27	28,26	4,987	3,0E+07	127,76	80,6	7,3E-06	28806,79	15537,15	24973,16
9	2856	14,69	6	0,2775	0,3	23,27	28,26	4,986	3,0E+07	131,09	80,6	7,3E-06	29296,36	16355,35	25428,76
10	2901	14,69	6	0,2774	0,3	23,28	28,26	4,984	3,0E+07	131,73	80,6	7,3E-06	29775,53	16582,56	25842,00
11	2955	14,69	6	0,2771	0,3	23,28	28,26	4,980	3,0E+07	133,39	80,6	7,3E-06	30361,37	17052,57	26360,27
12	3025	14,69	6	0,2769	0,3	23,28	28,26	4,975	3,0E+07	133,52	80,6	7,3E-06	31113,45	17218,61	26996,24
13	3114	14,69	6	0,2765	0,3	23,29	28,26	4,970	3,0E+07	135,75	80,6	7,3E-06	32073,54	17882,60	27837,76
14	3236	14,69	6	0,2762	0,3	23,30	28,26	4,964	3,0E+07	139,14	80,6	7,3E-06	33379,91	18860,71	28989,24
15	3321	14,69	6	0,2760	0,3	23,30	28,26	4,960	3,0E+07	141,46	80,6	7,3E-06	34286,27	19535,07	29788,97
16	3375	14,69	6	0,2755	0,3	23,31	28,26	4,951	3,0E+07	143,86	80,6	7,3E-06	34916,87	20175,07	30360,68
17	3420	14,69	6	0,2744	0,3	23,33	28,26	4,934	3,0E+07	144,15	80,6	7,3E-06	35521,13	20350,04	30871,00
18	3445	14,69	6	0,2741	0,3	23,33	28,26	4,927	3,0E+07	145,22	80,6	7,3E-06	35835,31	20642,60	31153,69
19	3468	14,69	6	0,2737	0,3	23,34	28,26	4,922	3,0E+07	146,28	80,6	7,3E-06	36121,72	20929,11	31413,55
20	3500	14,69	6	0,2736	0,3	23,34	28,26	4,920	3,0E+07	150,00	80,6	7,3E-06	36467,25	21805,77	31782,94

Equivalent Stress

Elbow Section 3

No	Tekanan Operasional, Pi (psi)	Tekanan Eksternal, Pe (psi)	Diameter Luar (in)	t (in)	Poisson's Ratio	Internal Bore Area, Ai (in ²)	Eksternal area of pipe, Ae (in ²)	Pipe cross section area, As (in ²)	Modulus Young (psi)	Temperature of pipe, Ta (°F)	Ambient Temperature, Ta (°F)	Thermal expansion coefficient (α)	Hoop Stress (psi)	Longitudinal stress (psi)	Equivalent Stress (psi)
1	2400	14,69	6	0,2798	0,3	23,23	28,26	5,03	3,0E+07	110,00	80,6	7,3E-06	24385,39	10844,41	21161,36
2	2420	14,69	6	0,2797	0,3	23,24	28,26	5,02	3,0E+07	113,68	80,6	7,3E-06	24594,01	11687,23	21307,77
3	2478	14,69	6	0,2796	0,3	23,24	28,26	5,02	3,0E+07	114,99	80,6	7,3E-06	25194,11	12084,64	21824,76
4	2512	14,69	6	0,2794	0,3	23,24	28,26	5,02	3,0E+07	115,77	80,6	7,3E-06	25565,81	12322,69	22145,43
5	2580	14,69	6	0,2792	0,3	23,24	28,26	5,02	3,0E+07	116,19	80,6	7,3E-06	26282,41	12545,01	22769,04
6	2686	14,69	6	0,2786	0,3	23,25	28,26	5,01	3,0E+07	124,22	80,6	7,3E-06	27425,45	14510,84	23764,54
7	2734	14,69	6	0,2782	0,3	23,26	28,26	5,00	3,0E+07	127,11	80,6	7,3E-06	27960,29	15241,09	24247,13
8	2809	14,69	6	0,2779	0,3	23,27	28,26	4,99	3,0E+07	127,76	80,6	7,3E-06	28769,24	15529,66	24941,19
9	2856	14,69	6	0,2777	0,3	23,27	28,26	4,99	3,0E+07	131,09	80,6	7,3E-06	29271,75	16350,44	25408,00
10	2901	14,69	6	0,2776	0,3	23,27	28,26	4,99	3,0E+07	131,73	80,6	7,3E-06	29744,60	16576,39	25815,88
11	2955	14,69	6	0,2774	0,3	23,28	28,26	4,98	3,0E+07	133,39	80,6	7,3E-06	30328,41	17045,99	26332,50
12	3025	14,69	6	0,2771	0,3	23,28	28,26	4,98	3,0E+07	133,52	80,6	7,3E-06	31080,80	17212,09	26968,63
13	3114	14,69	6	0,2768	0,3	23,29	28,26	4,97	3,0E+07	135,75	80,6	7,3E-06	32036,65	17875,24	27806,63
14	3236	14,69	6	0,2764	0,3	23,29	28,26	4,97	3,0E+07	139,14	80,6	7,3E-06	33351,38	18855,02	28965,24
15	3321	14,69	6	0,2762	0,3	23,30	28,26	4,96	3,0E+07	141,46	80,6	7,3E-06	34255,44	19528,92	29763,10
16	3375	14,69	6	0,2759	0,3	23,30	28,26	4,96	3,0E+07	143,86	80,6	7,3E-06	34863,71	20164,46	30316,26
17	3420	14,69	6	0,2751	0,3	23,31	28,26	4,95	3,0E+07	144,15	80,6	7,3E-06	35428,76	20331,61	30793,63
18	3445	14,69	6	0,2748	0,3	23,32	28,26	4,94	3,0E+07	145,22	80,6	7,3E-06	35735,54	20622,70	31070,26
19	3468	14,69	6	0,2745	0,3	23,33	28,26	4,93	3,0E+07	146,28	80,6	7,3E-06	36015,44	20907,90	31324,83
20	3500	14,69	6	0,2742	0,3	23,33	28,26	4,93	3,0E+07	150,00	80,6	7,3E-06	36391,64	21790,68	31720,45

Equivalent Stress

Elbow Section 4

No	Tekanan Operasional, Pi (psi)	Tekanan Eksternal, Pe (psi)	Diameter Luar (in)	t (in)	Poisson's Ratio	Internal Bore Area, Ai (in ²)	Eksternal area of pipe, Ae (in ²)	Pipe cross section area, As (in ²)	Modulus Young (psi)	Temperature of pipe, Ta (°F)	Ambient Temperature, Ta (°F)	Thermal expansion coefficient (α)	Hoop Stress (psi)	Longitudinal stress (psi)	Equivalent Stress (psi)
1	2400	14,69	6	0,2797	0,3	23,235	28,26	5,025	3,0E+07	110,00	80,6	7,3E-06	24387,20	10844,77	21162,96
2	2420	14,69	6	0,2797	0,3	23,236	28,26	5,024	3,0E+07	113,68	80,6	7,3E-06	24596,67	11687,76	21310,09
3	2478	14,69	6	0,2796	0,3	23,238	28,26	5,022	3,0E+07	114,99	80,6	7,3E-06	25197,08	12085,23	21827,35
4	2512	14,69	6	0,2793	0,3	23,242	28,26	5,018	3,0E+07	115,77	80,6	7,3E-06	25572,11	12323,95	22150,91
5	2580	14,69	6	0,2791	0,3	23,246	28,26	5,014	3,0E+07	116,19	80,6	7,3E-06	26290,51	12546,63	22776,12
6	2686	14,69	6	0,2785	0,3	23,257	28,26	5,003	3,0E+07	124,22	80,6	7,3E-06	27442,58	14514,25	23779,19
7	2734	14,69	6	0,2781	0,3	23,263	28,26	4,997	3,0E+07	127,11	80,6	7,3E-06	27969,86	15243,00	24255,26
8	2809	14,69	6	0,2776	0,3	23,272	28,26	4,988	3,0E+07	127,76	80,6	7,3E-06	28799,87	15535,77	24967,27
9	2856	14,69	6	0,2776	0,3	23,272	28,26	4,988	3,0E+07	131,09	80,6	7,3E-06	29283,71	16352,83	25418,09
10	2901	14,69	6	0,2775	0,3	23,273	28,26	4,987	3,0E+07	131,73	80,6	7,3E-06	29757,89	16579,04	25827,11
11	2955	14,69	6	0,2772	0,3	23,278	28,26	4,982	3,0E+07	133,39	80,6	7,3E-06	30348,14	17049,93	26349,12
12	3025	14,69	6	0,2770	0,3	23,282	28,26	4,978	3,0E+07	133,52	80,6	7,3E-06	31096,93	17215,31	26982,27
13	3114	14,69	6	0,2766	0,3	23,288	28,26	4,972	3,0E+07	135,75	80,6	7,3E-06	32060,63	17880,02	27826,87
14	3236	14,69	6	0,2763	0,3	23,294	28,26	4,966	3,0E+07	139,14	80,6	7,3E-06	33365,50	18857,84	28977,12
15	3321	14,69	6	0,2761	0,3	23,297	28,26	4,963	3,0E+07	141,46	80,6	7,3E-06	34270,74	19531,98	29775,94
16	3375	14,69	6	0,2757	0,3	23,305	28,26	4,955	3,0E+07	143,86	80,6	7,3E-06	34889,96	20169,70	30338,20
17	3420	14,69	6	0,2747	0,3	23,321	28,26	4,939	3,0E+07	144,15	80,6	7,3E-06	35485,73	20342,97	30841,34
18	3445	14,69	6	0,2743	0,3	23,328	28,26	4,932	3,0E+07	145,22	80,6	7,3E-06	35797,07	20634,97	31121,71
19	3468	14,69	6	0,2740	0,3	23,333	28,26	4,927	3,0E+07	146,28	80,6	7,3E-06	36080,99	20920,98	31379,54
20	3500	14,69	6	0,2738	0,3	23,337	28,26	4,923	3,0E+07	150,00	80,6	7,3E-06	36441,57	21800,64	31761,71

Montecarlo

Elbow Section 1

RNG Equivalent stress (psi)	Yield Strength, 0,9 SMYS (psi)	MK (psi)	Status	
25858,65	31500	5641,35	0	1
26837,24	31500	4662,76	0	1
26858,70	31500	4641,30	0	1
18454,30	31500	13045,70	0	1
27570,83	31500	3929,17	0	1
28974,45	31500	2525,55	0	1
28882,55	31500	2617,45	0	1
30510,96	31500	989,04	0	1
21079,69	31500	10420,31	0	1
24042,92	31500	7457,08	0	1
25510,10	31500	5989,90	0	1
24445,94	31500	7054,06	0	1
23712,59	31500	7787,41	0	1
27396,85	31500	4103,15	0	1
24750,17	31500	6749,83	0	1
28888,52	31500	2611,48	0	1
22287,54	31500	9212,46	0	1
28414,80	31500	3085,20	0	1
28004,32	31500	3495,68	0	1
26325,92	31500	5174,08	0	1
27707,78	31500	3792,22	0	1
32644,07	31500	-1144,07	0	0
26470,63	31500	5029,37	0	1
33117,82	31500	-1617,82	0	0
21543,50	31500	9956,50	0	1
24296,86	31500	7203,14	0	1
26798,91	31500	4701,09	0	1
24606,98	31500	6893,02	0	1
24236,38	31500	7263,62	0	1
...
...
...
...
19505,07	31500	11994,93	0	1
29335,40	31500	2164,60	0	1
21305,13	31500	10194,87	0	1

Jumlah RNG	1000
Jumlah Berhasil	924
Jumlah Gagal	76
PoF	0,076

RNG Equivalent stress (psi)	Yield Strength, 0,9 SMYS (psi)	MK (psi)	Status	
27832,37943	31500	3667,621	0	1
26317,0166	31500	5182,983	0	1
28341,05727	31500	3158,943	0	1
28907,15592	31500	2592,844	0	1
23342,08552	31500	8157,914	0	1
24400,57041	31500	7099,43	0	1
26964,38289	31500	4535,617	0	1
26563,52657	31500	4936,473	0	1
27862,2361	31500	3637,764	0	1
30774,02519	31500	725,9748	0	1
24298,13246	31500	7201,868	0	1
24094,97093	31500	7405,029	0	1
26354,19691	31500	5145,803	0	1
26400,05554	31500	5099,944	0	1
27150,42492	31500	4349,575	0	1
22132,75884	31500	9367,241	0	1
24835,10618	31500	6664,894	0	1
24516,58625	31500	6983,414	0	1
24882,36579	31500	6617,634	0	1
22373,97498	31500	9126,025	0	1
23790,71582	31500	7709,284	0	1
25121,72554	31500	6378,274	0	1
27348,71643	31500	4151,284	0	1
24030,94081	31500	7469,059	0	1
28618,55687	31500	2881,443	0	1
27896,80883	31500	3603,191	0	1
27240,13998	31500	4259,86	0	1
32629,69203	31500	-1129,69	0	0
20961,78685	31500	10538,21	0	1
...
...
...
...
27032,66921	31500	4467,331	0	1
21223,56805	31500	10276,43	0	1
31569,92941	31500	-69,9294	0	0

Jumlah RNG	2000
Jumlah Berhasil	1847
Jumlah Gagal	153
PoF	0,077

RNG Equivalent stress (psi)	Yield Strength, 0,9 SMYS (psi)	MK (psi)	Status	
31950,66	31500	-450,664	0	0
29456,11	31500	2043,888	0	1
29968,24	31500	1531,758	0	1
27050,6	31500	4449,398	0	1
29252,63	31500	2247,372	0	1
27164,48	31500	4335,52	0	1
24977,18	31500	6522,819	0	1
27725,58	31500	3774,419	0	1
24499,44	31500	7000,563	0	1
21718,71	31500	9781,289	0	1
26617,85	31500	4882,148	0	1
28168,17	31500	3331,832	0	1
32436,96	31500	-936,958	0	0
30459,53	31500	1040,473	0	1
29064,59	31500	2435,414	0	1
28809,66	31500	2690,343	0	1
22350,36	31500	9149,643	0	1
23211,06	31500	8288,938	0	1
26683,1	31500	4816,901	0	1
25362,64	31500	6137,356	0	1
29343,14	31500	2156,858	0	1
22495,97	31500	9004,03	0	1
24374,94	31500	7125,062	0	1
22531,46	31500	8968,542	0	1
24659,58	31500	6840,422	0	1
33303,62	31500	-1803,62	0	0
30840,14	31500	659,8558	0	1
25343,19	31500	6156,807	0	1
22568,69	31500	8931,312	0	1
29742,1	31500	1757,897	0	1
34091,99	31500	-2591,99	0	0
...
...
...
...
27898,87	31500	3601,132	0	1
22789,2	31500	8710,797	0	1
25293,24	31500	6206,758	0	1

Jumlah RNG	3000
Jumlah Berhasil	2781
Jumlah Gagal	219
PoF	0,073

Jumlah RNG	4000
Jumlah Berhasil	3682
Jumlah Gagal	318
PoF	0,080

RNG Equivalent stress (psi)	Yield Strength, 0,9 SMYS (psi)	MK (psi)	Status	
27185,4	31500	4314,602	0	1
22561,09	31500	8938,913	0	1
27059,37	31500	4440,633	0	1
27344,29	31500	4155,715	0	1
26769,62	31500	4730,379	0	1
30634,66	31500	865,3397	0	1
27567,33	31500	3932,672	0	1
27646,76	31500	3853,239	0	1
26936,56	31500	4563,443	0	1
23863,95	31500	7636,049	0	1
25588,91	31500	5911,09	0	1
20809,3	31500	10690,7	0	1
25954,71	31500	5545,287	0	1
28332,11	31500	3167,891	0	1
16308,66	31500	15191,34	0	1
21267,94	31500	10232,06	0	1
32055,12	31500	-555,115	0	0
24334,52	31500	7165,484	0	1
26488,02	31500	5011,978	0	1
22524,38	31500	8975,624	0	1
27592,1	31500	3907,904	0	1
30346,27	31500	1153,732	0	1
28069,49	31500	3430,51	0	1
32616,77	31500	-1116,77	0	0
24068,99	31500	7431,009	0	1
23442,09	31500	8057,913	0	1
29294,63	31500	2205,371	0	1
29856,11	31500	1643,892	0	1
26191,55	31500	5308,445	0	1
23645,36	31500	7854,639	0	1
21963,06	31500	9536,94	0	1
...
...
...
...
27133,74	31500	4366,265	0	1
20766,06	31500	10733,94	0	1
28268,14	31500	3231,855	0	1
27710,02	31500	3789,983	0	1
25932,99	31500	5567,008	0	1

Jumlah RNG	5000
Jumlah Berhasil	4570
Jumlah Gagal	430
PoF	0,086

RNG Equivalent stress (psi)	Yield Strength, 0,9 SMYS (psi)	MK (psi)	Status	
25718,47	31500	5781,533	0	1
29628,22	31500	1871,782	0	1
26051,24	31500	5448,756	0	1
25730,94	31500	5769,061	0	1
27187,57	31500	4312,429	0	1
19089,15	31500	12410,85	0	1
25921,83	31500	5578,167	0	1
28880,11	31500	2619,893	0	1
26054,23	31500	5445,772	0	1
28239,22	31500	3260,779	0	1
23035,48	31500	8464,522	0	1
28975,52	31500	2524,479	0	1
20598,22	31500	10901,78	0	1
20949,97	31500	10550,03	0	1
27378,8	31500	4121,199	0	1
25595,88	31500	5904,121	0	1
26836,51	31500	4663,487	0	1
26180,55	31500	5319,449	0	1
28362,95	31500	3137,049	0	1
22834,74	31500	8665,255	0	1
30034,68	31500	1465,319	0	1
24016,85	31500	7483,147	0	1
26749,8	31500	4750,195	0	1
31555,64	31500	-55,6354	0	0
24052,48	31500	7447,522	0	1
25857,33	31500	5642,668	0	1
22231,18	31500	9268,825	0	1
19761,07	31500	11738,93	0	1
19913,67	31500	11586,33	0	1
21824,7	31500	9675,3	0	1
20562,17	31500	10937,83	0	1
...
...
...
...
24874,92	31500	6625,084	0	1
27016,53	31500	4483,47	0	1
29674,21	31500	1825,791	0	1

Jumlah RNG	6000
Jumlah Berhasil	5490
Jumlah Gagal	510
PoF	0,085

RNG Equivalent stress (psi)	Yield Strength, 0,9 SMYS (psi)	MK (psi)	Status	
26196,9	31500	5303,1	0	1
24034,51	31500	7465,493	0	1
23089,11	31500	8410,894	0	1
23768,42	31500	7731,583	0	1
25315,79	31500	6184,211	0	1
26444,11	31500	5055,889	0	1
28127,05	31500	3372,947	0	1
27531,44	31500	3968,563	0	1
25444,24	31500	6055,759	0	1
28344,19	31500	3155,805	0	1
22794,32	31500	8705,683	0	1
33090,17	31500	-1590,17	0	0
27680,59	31500	3819,414	0	1
24990,59	31500	6509,411	0	1
23320,75	31500	8179,25	0	1
32572,97	31500	-1072,97	0	0
27911,3	31500	3588,696	0	1
27312,36	31500	4187,638	0	1
21239,53	31500	10260,47	0	1
20126,73	31500	11373,27	0	1
26145,64	31500	5354,361	0	1
28480,16	31500	3019,842	0	1
25393,66	31500	6106,34	0	1
24857,26	31500	6642,744	0	1
34632,1	31500	-3132,1	0	0
26593,44	31500	4906,557	0	1
28200,34	31500	3299,661	0	1
27178,89	31500	4321,11	0	1
29394,91	31500	2105,092	0	1
29608,33	31500	1891,675	0	1
23839,77	31500	7660,23	0	1
...
...
...
...
30247,6	31500	1252,403	0	1
21410,39	31500	10089,61	0	1
25004,48	31500	6495,516	0	1

Jumlah RNG	7000
Jumlah Berhasil	6444
Jumlah Gagal	556
PoF	0,079

RNG Equivalent stress (psi)	Yield Strength, 0,9 SMYS (psi)	MK (psi)	Status	
25561,26	31500	5938,742	0	1
28269,79	31500	3230,211	0	1
28785,88	31500	2714,125	0	1
32232,19	31500	-732,186	0	0
27328,55	31500	4171,45	0	1
32268,71	31500	-768,707	0	0
23785,3	31500	7714,703	0	1
28707,04	31500	2792,959	0	1
23713,48	31500	7786,524	0	1
33098,04	31500	-1598,04	0	0
25663,52	31500	5836,482	0	1
24501,92	31500	6998,083	0	1
25435,76	31500	6064,235	0	1
28272,68	31500	3227,319	0	1
29326,93	31500	2173,068	0	1
19315,38	31500	12184,62	0	1
22724,99	31500	8775,008	0	1
25414,48	31500	6085,524	0	1
26536,59	31500	4963,415	0	1
25686,13	31500	5813,873	0	1
28631,38	31500	2868,616	0	1
26200,51	31500	5299,488	0	1
25490,96	31500	6009,043	0	1
23334,15	31500	8165,852	0	1
23627,59	31500	7872,414	0	1
30718,64	31500	781,3553	0	1
24651,2	31500	6848,798	0	1
32086,79	31500	-586,791	0	0
27962,87	31500	3537,132	0	1
23498,54	31500	8001,457	0	1
24130,5	31500	7369,495	0	1
...
...
...
...
32191,84	31500	-691,836	0	0
30541,29	31500	958,7116	0	1
24781,11	31500	6718,888	0	1

Jumlah RNG	8000
Jumlah Berhasil	7408
Jumlah Gagal	592
PoF	0,074

RNG Equivalent stress (psi)	Yield Strength, 0,9 SMYS (psi)	MK (psi)	Status	
28449,9	31500	3050,101	0	1
23941,86	31500	7558,142	0	1
21804,74	31500	9695,259	0	1
26146,13	31500	5353,871	0	1
25493,08	31500	6006,916	0	1
32716,07	31500	-1216,07	0	0
27438,92	31500	4061,084	0	1
28140,3	31500	3359,701	0	1
33290,27	31500	-1790,27	0	0
28585,83	31500	2914,175	0	1
30532,76	31500	967,2368	0	1
27437,25	31500	4062,749	0	1
34164,03	31500	-2664,03	0	0
23611,9	31500	7888,105	0	1
24653,38	31500	6846,623	0	1
24932,24	31500	6567,764	0	1
26751,23	31500	4748,772	0	1
29502,76	31500	1997,242	0	1
27378,95	31500	4121,053	0	1
23898,15	31500	7601,848	0	1
30533,21	31500	966,7855	0	1
24231,34	31500	7268,662	0	1
32804,34	31500	-1304,34	0	0
22190,82	31500	9309,185	0	1
29825,68	31500	1674,322	0	1
21597,4	31500	9902,596	0	1
26066	31500	5433,997	0	1
22585,02	31500	8914,977	0	1
27276,13	31500	4223,869	0	1
29940,76	31500	1559,243	0	1
21396,7	31500	10103,3	0	1
...
...
...
...
24451,84	31500	7048,164	0	1
24232,95	31500	7267,054	0	1
26985,83	31500	4514,169	0	1

Jumlah RNG	9000
Jumlah Berhasil	8301
Jumlah Gagal	699
PoF	0,078

RNG Equivalent stress (psi)	Yield Strength, 0,9 SMYS (psi)	MK (psi)	Status	
22319,58	31500	9180,419	0	1
26333,07	31500	5166,927	0	1
28602,99	31500	2897,012	0	1
23629,14	31500	7870,856	0	1
28969,67	31500	2530,326	0	1
24784,92	31500	6715,081	0	1
22521,22	31500	8978,784	0	1
24949,07	31500	6550,929	0	1
25733,31	31500	5766,689	0	1
25535,82	31500	5964,184	0	1
30247,63	31500	1252,368	0	1
24755,03	31500	6744,966	0	1
24528,2	31500	6971,799	0	1
27042,2	31500	4457,804	0	1
21969,59	31500	9530,414	0	1
26886,3	31500	4613,702	0	1
25202,18	31500	6297,823	0	1
28801,44	31500	2698,558	0	1
32265,01	31500	-765,008	0	0
25647,85	31500	5852,148	0	1
24687,93	31500	6812,075	0	1
20141,92	31500	11358,08	0	1
30881,06	31500	618,9419	0	1
32938,27	31500	-1438,27	0	0
27210,38	31500	4289,621	0	1
25955,87	31500	5544,127	0	1
28644,65	31500	2855,349	0	1
19697,83	31500	11802,17	0	1
23284,4	31500	8215,598	0	1
25713,01	31500	5786,991	0	1
23022,84	31500	8477,156	0	1
...
...
...
...
21802,17	31500	9697,826	0	1
20048,04	31500	11451,96	0	1
20767,13	31500	10732,87	0	1

Jumlah RNG	10000
Jumlah Berhasil	9221
Jumlah Gagal	779
PoF	0,078

RNG Equivalent stress (psi)	Yield Strength, 0,9 SMYS (psi)	MK (psi)	Status	
32379,88	31500	-879,876	0	0
32514,16	31500	-1014,16	0	0
28616,17	31500	2883,834	0	1
19274,45	31500	12225,55	0	1
30754,68	31500	745,3204	0	1
29144,1	31500	2355,905	0	1
26160,13	31500	5339,867	0	1
27853,14	31500	3646,857	0	1
26782,19	31500	4717,806	0	1
29390,58	31500	2109,42	0	1
29214,86	31500	2285,141	0	1
30164,11	31500	1335,885	0	1
28421,93	31500	3078,071	0	1
23975,44	31500	7524,561	0	1
26173,8	31500	5326,198	0	1
25579,59	31500	5920,41	0	1
23666,62	31500	7833,375	0	1
26312,67	31500	5187,326	0	1
20296,65	31500	11203,35	0	1
33427,98	31500	-1927,98	0	0
26305,72	31500	5194,275	0	1
23636,97	31500	7863,033	0	1
28797,24	31500	2702,765	0	1
24266,67	31500	7233,334	0	1
24960,78	31500	6539,222	0	1
26780,56	31500	4719,435	0	1
29420,87	31500	2079,134	0	1
28613,91	31500	2886,093	0	1
28599,44	31500	2900,559	0	1
25972,87	31500	5527,129	0	1
25420,23	31500	6079,766	0	1
20310,54	31500	11189,46	0	1
25233,13	31500	6266,872	0	1
24089,61	31500	7410,388	0	1
...
...
...
...
22508,74	31500	8991,262	0	1
26083,77	31500	5416,233	0	1
26102,38	31500	5397,621	0	1

Montecarlo

Elbow Section 2

Jumlah RNG	1000
Jumlah Berhasil	921
Jumlah Gagal	79
PoF	0,079

RNG Equivalent stress (psi)	Yield Strength, 0,9 SMYS (psi)	MK (psi)	Status	
20205,18	31500	11294,82	0	1
32562,23	31500	-1062,23	0	0
25722,9	31500	5777,102	0	1
35265,36	31500	-3765,36	0	0
30944,24	31500	555,7607	0	1
32732,14	31500	-1232,14	0	0
23248,28	31500	8251,718	0	1
22820,48	31500	8679,52	0	1
33821,88	31500	-2321,88	0	0
22680,8	31500	8819,202	0	1
22113,13	31500	9386,869	0	1
35352,96	31500	-3852,96	0	0
21394,04	31500	10105,96	0	1
28190,95	31500	3309,05	0	1
30839,01	31500	660,9893	0	1
29715,58	31500	1784,425	0	1
20056,51	31500	11443,49	0	1
25805,23	31500	5694,775	0	1
25604,79	31500	5895,212	0	1
27885,14	31500	3614,864	0	1
28125,53	31500	3374,473	0	1
21110,18	31500	10389,82	0	1
26817,11	31500	4682,891	0	1
23132,11	31500	8367,887	0	1
26009,52	31500	5490,483	0	1
26645,09	31500	4854,907	0	1
32507,83	31500	-1007,83	0	0
31178,14	31500	321,857	0	1
25073,3	31500	6426,696	0	1
...
...
...
...
26839,6	31500	4660,404	0	1
23517,27	31500	7982,725	0	1
22467,05	31500	9032,95	0	1

Jumlah RNG	2000
Jumlah Berhasil	1823
Jumlah Gagal	177
PoF	0,089

RNG Equivalent stress (psi)	Yield Strength, 0,9 SMYS (psi)	MK (psi)	Status	
25733,77	31500	5766,226	0	1
23252,18	31500	8247,825	0	1
16875,73	31500	14624,27	0	1
20934,43	31500	10565,57	0	1
24144,08	31500	7355,92	0	1
22068,29	31500	9431,713	0	1
25511,44	31500	5988,563	0	1
23234,71	31500	8265,29	0	1
21563,38	31500	9936,616	0	1
24823,13	31500	6676,868	0	1
35748,34	31500	-4248,34	0	0
26130,12	31500	5369,878	0	1
28380,31	31500	3119,689	0	1
27808,54	31500	3691,464	0	1
23893,47	31500	7606,533	0	1
26711,54	31500	4788,464	0	1
30834,91	31500	665,093	0	1
22538,91	31500	8961,09	0	1
29409,12	31500	2090,876	0	1
33306,02	31500	-1806,02	0	0
30811,52	31500	688,4756	0	1
28840,61	31500	2659,386	0	1
26978,7	31500	4521,302	0	1
27955,67	31500	3544,325	0	1
26294,02	31500	5205,982	0	1
26933,24	31500	4566,762	0	1
26178,57	31500	5321,431	0	1
23339,29	31500	8160,707	0	1
32090,45	31500	-590,451	0	0
...
...
...
...
27628,92	31500	3871,079	0	1
30381,01	31500	1118,992	0	1
26505,91	31500	4994,092	0	1

Jumlah RNG	3000
Jumlah Berhasil	2749
Jumlah Gagal	251
PoF	0,084

RNG Equivalent stress (psi)	Yield Strength, 0,9 SMYS (psi)	MK (psi)	Status	
25730	31500	5770	0	1
22166,65	31500	9333,352	0	1
16866,77	31500	14633,23	0	1
25469,96	31500	6030,038	0	1
26338,68	31500	5161,319	0	1
32922,37	31500	-1422,37	0	0
28787,42	31500	2712,579	0	1
27601,46	31500	3898,544	0	1
24868,28	31500	6631,723	0	1
22750,7	31500	8749,298	0	1
25681,93	31500	5818,073	0	1
27649,32	31500	3850,678	0	1
31393,54	31500	106,4615	0	1
29813,03	31500	1686,967	0	1
26195,44	31500	5304,562	0	1
25960,53	31500	5539,475	0	1
30580,68	31500	919,3202	0	1
27078,95	31500	4421,05	0	1
19227,46	31500	12272,54	0	1
18688,84	31500	12811,16	0	1
24261,53	31500	7238,468	0	1
26805,31	31500	4694,689	0	1
31158,58	31500	341,4168	0	1
25942,71	31500	5557,293	0	1
20461,63	31500	11038,37	0	1
26264,41	31500	5235,586	0	1
30556,98	31500	943,0171	0	1
29588,56	31500	1911,438	0	1
23283,78	31500	8216,222	0	1
...
...
...
...
24755,83	31500	6744,174	0	1
27849,39	31500	3650,615	0	1
27220,35	31500	4279,649	0	1

Jumlah RNG	4000
Jumlah Berhasil	3672
Jumlah Gagal	328
PoF	0,082

RNG Equivalent stress (psi)	Yield Strength, 0,9 SMYS (psi)	MK (psi)	Status	
24882,81	31500	6617,191	0	1
30865,77	31500	634,2327	0	1
28682,96	31500	2817,036	0	1
28744,57	31500	2755,434	0	1
28558,3	31500	2941,7	0	1
15943,05	31500	15556,95	0	1
30445,15	31500	1054,846	0	1
24028,28	31500	7471,721	0	1
24767,3	31500	6732,705	0	1
33612,6	31500	-2112,6	0	0
22415,44	31500	9084,564	0	1
27805,92	31500	3694,08	0	1
24759,59	31500	6740,406	0	1
22792,16	31500	8707,839	0	1
33105,17	31500	-1605,17	0	0
30574,39	31500	925,6109	0	1
20447,64	31500	11052,36	0	1
24275,41	31500	7224,594	0	1
32780,72	31500	-1280,72	0	0
26469,12	31500	5030,881	0	1
26418,55	31500	5081,448	0	1
20378,72	31500	11121,28	0	1
31810,62	31500	-310,616	0	0
27968,93	31500	3531,066	0	1
22763,54	31500	8736,458	0	1
26030,74	31500	5469,264	0	1
22790,57	31500	8709,428	0	1
33323,57	31500	-1823,57	0	0
26194,25	31500	5305,755	0	1
...
...
...
...
25911,13	31500	5588,872	0	1
23573,47	31500	7926,531	0	1
24809,68	31500	6690,322	0	1

Jumlah RNG	5000
Jumlah Berhasil	4583
Jumlah Gagal	417
PoF	0,083

RNG Equivalent stress (psi)	Yield Strength, 0,9 SMYS (psi)	MK (psi)	Status	
23652,69	31500	7847,313	0	1
22577,44	31500	8922,559	0	1
29903,83	31500	1596,165	0	1
25978,62	31500	5521,375	0	1
27844,7	31500	3655,298	0	1
25663,08	31500	5836,916	0	1
29547,48	31500	1952,517	0	1
30394,33	31500	1105,667	0	1
21838,18	31500	9661,817	0	1
22019,63	31500	9480,374	0	1
30104,83	31500	1395,172	0	1
30428,36	31500	1071,645	0	1
23357,37	31500	8142,625	0	1
34346,05	31500	-2846,05	0	0
24475,81	31500	7024,191	0	1
24770,98	31500	6729,019	0	1
24732,12	31500	6767,881	0	1
32642,87	31500	-1142,87	0	0
29113,62	31500	2386,38	0	1
28948,54	31500	2551,457	0	1
26996,14	31500	4503,858	0	1
28128,27	31500	3371,733	0	1
27821,47	31500	3678,53	0	1
26546,62	31500	4953,379	0	1
27900,01	31500	3599,992	0	1
24010,6	31500	7489,4	0	1
29170,45	31500	2329,555	0	1
25508,28	31500	5991,718	0	1
21416,69	31500	10083,31	0	1
...
...
...
...
32143,11	31500	-643,106	0	0
29855,54	31500	1644,46	0	1
26443,7	31500	5056,304	0	1

Jumlah RNG	6000
Jumlah Berhasil	5500
Jumlah Gagal	500
PoF	0,083

Montecarlo

Elbow Section 3

RNG Equivalent stress (psi)	Yield Strength, 0,9 SMYS (psi)	MK (psi)	Status	
31841,24	31500	-341,24	0	0
24075,8	31500	7424,198	0	1
28361,24	31500	3138,759	0	1
25197,54	31500	6302,457	0	1
28140,34	31500	3359,659	0	1
30464,39	31500	1035,607	0	1
23792,61	31500	7707,393	0	1
23725,54	31500	7774,463	0	1
25257,27	31500	6242,725	0	1
25309,61	31500	6190,389	0	1
29807,47	31500	1692,525	0	1
21902,84	31500	9597,159	0	1
26704,47	31500	4795,528	0	1
28303,44	31500	3196,562	0	1
26349,98	31500	5150,021	0	1
30868,43	31500	631,5663	0	1
32239,73	31500	-739,734	0	0
22640,72	31500	8859,284	0	1
21664,88	31500	9835,124	0	1
27714,03	31500	3785,968	0	1
27586,31	31500	3913,688	0	1
29399,01	31500	2100,994	0	1
28401,08	31500	3098,924	0	1
27938,66	31500	3561,335	0	1
27505,34	31500	3994,663	0	1
22806,06	31500	8693,943	0	1
31324,29	31500	175,7104	0	1
28666,02	31500	2833,985	0	1
24131,01	31500	7368,989	0	1
24181,09	31500	7318,907	0	1
30214,53	31500	1285,474	0	1
...
...
...
...
28934,93	31500	2565,069	0	1
23757,3	31500	7742,703	0	1
28147,96	31500	3352,039	0	1

Jumlah RNG	1000
Jumlah Berhasil	920
Jumlah Gagal	80
PoF	0,080

RNG Equivalent stress (psi)	Yield Strength, 0,9 SMYS (psi)	MK (psi)	Status	
26382,44	31500	5117,556	0	1
27461,84	31500	4038,16	0	1
24841,13	31500	6658,867	0	1
27223,32	31500	4276,683	0	1
24814,36	31500	6685,645	0	1
27427,81	31500	4072,188	0	1
27494,6	31500	4005,395	0	1
26960,52	31500	4539,479	0	1
30520,97	31500	979,0309	0	1
27674,04	31500	3825,957	0	1
24929,98	31500	6570,017	0	1
20470,44	31500	11029,56	0	1
26840,09	31500	4659,91	0	1
29569,81	31500	1930,19	0	1
28074,16	31500	3425,836	0	1
27750,3	31500	3749,701	0	1
23489,54	31500	8010,465	0	1
24758,99	31500	6741,012	0	1
26289,92	31500	5210,083	0	1
23755,78	31500	7744,218	0	1
32728,08	31500	-1228,08	0	0
31759,37	31500	-259,372	0	0
28699,18	31500	2800,816	0	1
26478,53	31500	5021,471	0	1
30813,9	31500	686,1029	0	1
21493,57	31500	10006,43	0	1
25118	31500	6381,996	0	1
27210,88	31500	4289,124	0	1
26621,07	31500	4878,932	0	1
22020,96	31500	9479,037	0	1
26446,46	31500	5053,542	0	1
31395,97	31500	104,0252	0	1
...
...
...
...
28127,98	31500	3372,023	0	1
25583,63	31500	5916,368	0	1
23633,85	31500	7866,147	0	1

Jumlah RNG	2000
Jumlah Berhasil	1838
Jumlah Gagal	162
PoF	0,081

RNG Equivalent stress (psi)	Yield Strength, 0,9 SMYS (psi)	MK (psi)	Status	
23396,92	31500	8103,085	0	1
30865,4	31500	634,6015	0	1
23163,58	31500	8336,419	0	1
25027,76	31500	6472,24	0	1
28630,68	31500	2869,325	0	1
20654,68	31500	10845,32	0	1
27135,04	31500	4364,963	0	1
21783,24	31500	9716,76	0	1
24104,46	31500	7395,544	0	1
25226,53	31500	6273,469	0	1
28904,07	31500	2595,927	0	1
29819,69	31500	1680,309	0	1
24980,53	31500	6519,468	0	1
27392,99	31500	4107,013	0	1
21523,12	31500	9976,875	0	1
25220,62	31500	6279,378	0	1
28852,08	31500	2647,918	0	1
28280,73	31500	3219,272	0	1
27325,78	31500	4174,217	0	1
23029,95	31500	8470,047	0	1
26275,06	31500	5224,936	0	1
20714,29	31500	10785,71	0	1
26916,52	31500	4583,482	0	1
27351,64	31500	4148,355	0	1
21551,69	31500	9948,308	0	1
24532,02	31500	6967,982	0	1
20903,19	31500	10596,81	0	1
24548,43	31500	6951,569	0	1
20949,34	31500	10550,66	0	1
24568,92	31500	6931,085	0	1
26770,67	31500	4729,332	0	1
...
...
...
...
28775,72	31500	2724,28	0	1
26126,43	31500	5373,571	0	1
23827,02	31500	7672,975	0	1

Jumlah RNG	3000
Jumlah Berhasil	2756
Jumlah Gagal	244
PoF	0,081

RNG Equivalent stress (psi)	Yield Strength, 0,9 SMYS (psi)	MK (psi)	Status	
25956,09	31500	5543,905	0	1
18522,17	31500	12977,83	0	1
27039	31500	4460,998	0	1
27531,29	31500	3968,712	0	1
28351,46	31500	3148,541	0	1
25248,7	31500	6251,305	0	1
29016,54	31500	2483,464	0	1
21304,61	31500	10195,39	0	1
28253,54	31500	3246,463	0	1
30372,77	31500	1127,231	0	1
27145,01	31500	4354,987	0	1
27717,04	31500	3782,958	0	1
21912,55	31500	9587,454	0	1
24232,43	31500	7267,568	0	1
23524,09	31500	7975,91	0	1
24077,31	31500	7422,692	0	1
30494,62	31500	1005,384	0	1
20980,31	31500	10519,69	0	1
28291,39	31500	3208,607	0	1
29487,54	31500	2012,459	0	1
22743,54	31500	8756,463	0	1
29726,04	31500	1773,956	0	1
28260,59	31500	3239,41	0	1
24437,59	31500	7062,414	0	1
...
...
...
...
28280,37	31500	3219,631	0	1
22268,7	31500	9231,302	0	1
30976,96	31500	523,0387	0	1

Jumlah RNG	4000
Jumlah Berhasil	3691
Jumlah Gagal	309
PoF	0,077

RNG Equivalent stress (psi)	Yield Strength, 0,9 SMYS (psi)	MK (psi)	Status	
25030,3	31500	6469,702	0	1
22114,46	31500	9385,544	0	1
25746,65	31500	5753,353	0	1
22479,46	31500	9020,537	0	1
22696,97	31500	8803,034	0	1
28941,13	31500	2558,873	0	1
21165,13	31500	10334,87	0	1
27425,4	31500	4074,602	0	1
33880,61	31500	-2380,61	0	0
33584,87	31500	-2084,87	0	0
30374,1	31500	1125,901	0	1
23187,06	31500	8312,937	0	1
25396,14	31500	6103,857	0	1
22743,48	31500	8756,522	0	1
24026,3	31500	7473,702	0	1
28514,52	31500	2985,476	0	1
33603,53	31500	-2103,53	0	0
22961,34	31500	8538,656	0	1
29914,58	31500	1585,42	0	1
23514,04	31500	7985,959	0	1
20341,37	31500	11158,63	0	1
30614,62	31500	885,3775	0	1
27778,76	31500	3721,243	0	1
28156,78	31500	3343,223	0	1
23349,88	31500	8150,123	0	1
25595,24	31500	5904,756	0	1
27573,77	31500	3926,232	0	1
28471,41	31500	3028,588	0	1
26855,86	31500	4644,144	0	1
...
...
...
...
25118,17	31500	6381,832	0	1
31404,54	31500	95,46121	0	1
29906,92	31500	1593,08	0	1

Jumlah RNG	5000
Jumlah Berhasil	4601
Jumlah Gagal	399
PoF	0,080

RNG Equivalent stress (psi)	Yield Strength, 0,9 SMYS (psi)	MK (psi)	Status	
23010,34	31500	8489,657	0	1
29270,6	31500	2229,398	0	1
26161,48	31500	5338,52	0	1
34827,62	31500	-3327,62	0	0
27216,17	31500	4283,834	0	1
30364,52	31500	1135,475	0	1
25071,37	31500	6428,628	0	1
29106,05	31500	2393,948	0	1
20218,91	31500	11281,09	0	1
29500,82	31500	1999,185	0	1
23504,96	31500	7995,044	0	1
28752,42	31500	2747,582	0	1
26750,62	31500	4749,376	0	1
27509,33	31500	3990,674	0	1
25297,02	31500	6202,976	0	1
26648	31500	4851,997	0	1
23021,25	31500	8478,745	0	1
29467,98	31500	2032,016	0	1
25353,79	31500	6146,213	0	1
21984,4	31500	9515,599	0	1
21220,71	31500	10279,29	0	1
23955,91	31500	7544,09	0	1
28568,9	31500	2931,096	0	1
25465,39	31500	6034,609	0	1
29420,2	31500	2079,796	0	1
27343,63	31500	4156,366	0	1
26145,39	31500	5354,611	0	1
28668,39	31500	2831,613	0	1
29812,08	31500	1687,917	0	1
28028,8	31500	3471,205	0	1
28895,4	31500	2604,603	0	1
...
...
...
...
35975,17	31500	-4475,17	0	0
26211,38	31500	5288,62	0	1
24858,99	31500	6641,011	0	1

Jumlah RNG	6000
Jumlah Berhasil	5497
Jumlah Gagal	503
PoF	0,084

RNG Equivalent stress (psi)	Yield Strength, 0,9 SMYS (psi)	MK (psi)	Status	
21051,82	31500	10448,18	0	1
23241,5	31500	8258,499	0	1
24650,64	31500	6849,358	0	1
29041,79	31500	2458,208	0	1
29785,83	31500	1714,169	0	1
22348,55	31500	9151,448	0	1
31850,81	31500	-350,812	0	0
23402,78	31500	8097,219	0	1
27278,45	31500	4221,549	0	1
26686,92	31500	4813,08	0	1
27064,23	31500	4435,767	0	1
24763,02	31500	6736,981	0	1
25563,61	31500	5936,386	0	1
23410,92	31500	8089,077	0	1
31440,22	31500	59,78148	0	1
29414,62	31500	2085,378	0	1
27165,05	31500	4334,946	0	1
24645,24	31500	6854,758	0	1
20918,27	31500	10581,73	0	1
29268,89	31500	2231,108	0	1
25670,17	31500	5829,834	0	1
24207,97	31500	7292,032	0	1
32120,17	31500	-620,169	0	0
28211,01	31500	3288,992	0	1
32264,97	31500	-764,965	0	0
28714,98	31500	2785,025	0	1
23074,52	31500	8425,475	0	1
26013,25	31500	5486,748	0	1
19142,48	31500	12357,52	0	1
23895,95	31500	7604,049	0	1
27306,41	31500	4193,595	0	1
...
...
...
...
24858,19	31500	6641,81	0	1
31475,08	31500	24,91536	0	1
23924,61	31500	7575,393	0	1

Jumlah RNG	7000
Jumlah Berhasil	6383
Jumlah Gagal	617
PoF	0,088

RNG Equivalent stress (psi)	Yield Strength, 0,9 SMYS (psi)	MK (psi)	Status	
24120,4	31500	7379,599	0	1
25797,71	31500	5702,289	0	1
23371,45	31500	8128,552	0	1
34141,91	31500	-2641,91	0	0
23965,66	31500	7534,344	0	1
26939,22	31500	4560,778	0	1
23019	31500	8481	0	1
31237,98	31500	262,0237	0	1
30643,95	31500	856,0482	0	1
25434,93	31500	6065,074	0	1
34110,24	31500	-2610,24	0	0
26449,63	31500	5050,373	0	1
22910,62	31500	8589,383	0	1
32926,37	31500	-1426,37	0	0
23709,87	31500	7790,135	0	1
22243,99	31500	9256,006	0	1
29000,25	31500	2499,749	0	1
26521,4	31500	4978,596	0	1
27273,67	31500	4226,332	0	1
28253,32	31500	3246,675	0	1
22389,91	31500	9110,09	0	1
32250,11	31500	-750,106	0	0
28734,73	31500	2765,267	0	1
30254,18	31500	1245,818	0	1
21702,73	31500	9797,271	0	1
26055,57	31500	5444,434	0	1
24581,2	31500	6918,798	0	1
24949,53	31500	6550,474	0	1
29032,06	31500	2467,938	0	1
21704,32	31500	9795,679	0	1
23924,29	31500	7575,708	0	1
...
...
...
...
25290,99	31500	6209,005	0	1
17373,79	31500	14126,21	0	1
25017,63	31500	6482,367	0	1

Jumlah RNG	8000
Jumlah Berhasil	7352
Jumlah Gagal	648
PoF	0,081

RNG Equivalent stress (psi)	Yield Strength, 0,9 SMYS (psi)	MK (psi)	Status	
24942,58	31500	6557,422	0	1
25951,86	31500	5548,14	0	1
34443,74	31500	-2943,74	0	0
28639,06	31500	2860,941	0	1
22869,41	31500	8630,59	0	1
25381,98	31500	6118,018	0	1
25527,01	31500	5972,988	0	1
19114,79	31500	12385,21	0	1
23235,59	31500	8264,415	0	1
23313,86	31500	8186,142	0	1
18792,23	31500	12707,77	0	1
19581,07	31500	11918,93	0	1
30707,74	31500	792,2645	0	1
26696,8	31500	4803,199	0	1
29999,98	31500	1500,018	0	1
32702,17	31500	-1202,17	0	0
23102,63	31500	8397,369	0	1
32518,97	31500	-1018,97	0	0
22561,36	31500	8938,644	0	1
27156,33	31500	4343,674	0	1
28120,42	31500	3379,584	0	1
26766,44	31500	4733,556	0	1
25742,89	31500	5757,113	0	1
31213,61	31500	286,3944	0	1
22303,04	31500	9196,962	0	1
25641,15	31500	5858,853	0	1
28368,4	31500	3131,597	0	1
21581,31	31500	9918,688	0	1
30349,53	31500	1150,474	0	1
19285,95	31500	12214,05	0	1
25737,05	31500	5762,951	0	1
...
...
...
...
22680,29	31500	8819,708	0	1
29837,94	31500	1662,057	0	1
25115,99	31500	6384,012	0	1

Jumlah RNG	9000
Jumlah Berhasil	8277
Jumlah Gagal	723
PoF	0,080

Montecarlo**Elbow Section 4**

Jumlah RNG	1000
Jumlah Berhasil	913
Jumlah Gagal	87
PoF	0,087

RNG Equivalent stress (psi)	Yield Strength, 0,9 SMYS (psi)	MK	Status	
24797,56	31500	6702,435	0	1
23148,9	31500	8351,095	0	1
21622,67	31500	9877,333	0	1
26528,2	31500	4971,802	0	1
32469,55	31500	-969,553	0	0
24582,78	31500	6917,223	0	1
28554,34	31500	2945,662	0	1
20652,66	31500	10847,34	0	1
22902,08	31500	8597,92	0	1
30316,96	31500	1183,039	0	1
22552,01	31500	8947,995	0	1
32340,82	31500	-840,822	0	0
31598,45	31500	-98,4504	0	0
35651,78	31500	-4151,78	0	0
18790,18	31500	12709,82	0	1
27000,96	31500	4499,036	0	1
24077,4	31500	7422,598	0	1
30108,92	31500	1391,083	0	1
28561,17	31500	2938,828	0	1
26367,96	31500	5132,04	0	1
33198,03	31500	-1698,03	0	0
22008,31	31500	9491,693	0	1
21498,55	31500	10001,45	0	1
33224,57	31500	-1724,57	0	0
25675,61	31500	5824,392	0	1
24141,68	31500	7358,318	0	1
30711,04	31500	788,964	0	1
23117,04	31500	8382,965	0	1
29735,06	31500	1764,943	0	1
...
...
...
...
...
24593,2	31500	6906,803	0	1
27409,74	31500	4090,258	0	1
30248,02	31500	1251,984	0	1

RNG Equivalent stress (psi)	Yield Strength, 0,9 SMYS (psi)	MK (psi)	Status	
23456,77	31500	8043,231	0	1
24468,24	31500	7031,761	0	1
28445,47	31500	3054,53	0	1
27175,73	31500	4324,268	0	1
16701,24	31500	14798,76	0	1
21183,02	31500	10316,98	0	1
26864,42	31500	4635,58	0	1
28796,69	31500	2703,308	0	1
28707,94	31500	2792,062	0	1
23041,53	31500	8458,473	0	1
32902,3	31500	-1402,3	0	0
22265,71	31500	9234,295	0	1
32054,86	31500	-554,857	0	0
26291,39	31500	5208,611	0	1
24886,64	31500	6613,359	0	1
21281,97	31500	10218,03	0	1
29882,73	31500	1617,265	0	1
28067,37	31500	3432,632	0	1
25339,72	31500	6160,278	0	1
22750,25	31500	8749,747	0	1
24798,21	31500	6701,793	0	1
26253,26	31500	5246,736	0	1
26753,54	31500	4746,458	0	1
31306,57	31500	193,4276	0	1
23298,6	31500	8201,4	0	1
32291,65	31500	-791,647	0	0
28602,39	31500	2897,606	0	1
26652,48	31500	4847,519	0	1
21922,62	31500	9577,375	0	1
...
...
...
...
25053,74	31500	6446,264	0	1
22213,42	31500	9286,582	0	1
26479,06	31500	5020,945	0	1

Jumlah RNG	2000
Jumlah Berhasil	1836
Jumlah Gagal	164
PoF	0,082

RNG Equivalent stress (psi)	Yield Strength, 0,9 SMYS (psi)	MK (psi)	Status	
22219,17	31500	9280,827	0	1
33470,38	31500	-1970,38	0	0
16011,16	31500	15488,84	0	1
27975,25	31500	3524,747	0	1
28672,07	31500	2827,934	0	1
28629,47	31500	2870,529	0	1
30687,19	31500	812,811	0	1
28646,92	31500	2853,084	0	1
27728,79	31500	3771,215	0	1
25856,06	31500	5643,941	0	1
23635,35	31500	7864,649	0	1
26209,84	31500	5290,16	0	1
25119,9	31500	6380,099	0	1
28353,43	31500	3146,574	0	1
26622,12	31500	4877,884	0	1
23844,15	31500	7655,853	0	1
23019,06	31500	8480,94	0	1
26660,01	31500	4839,988	0	1
25750,79	31500	5749,209	0	1
29409,86	31500	2090,143	0	1
23992,79	31500	7507,212	0	1
25481,55	31500	6018,449	0	1
25649,27	31500	5850,73	0	1
28177,51	31500	3322,494	0	1
21890,09	31500	9609,909	0	1
26719,11	31500	4780,889	0	1
27771,25	31500	3728,749	0	1
...
...
...
...
17927,57	31500	13572,43	0	1
24794,95	31500	6705,046	0	1
31124,72	31500	375,2759	0	1

Jumlah RNG	3000
Jumlah Berhasil	2760
Jumlah Gagal	240
PoF	0,080

RNG Equivalent stress (psi)	Yield Strength, 0,9 SMYS (psi)	MK (psi)	Status	
26055,34	31500	5444,658	0	1
19420,78	31500	12079,22	0	1
29352,51	31500	2147,495	0	1
24304,28	31500	7195,722	0	1
31783,76	31500	-283,757	0	0
29368,6	31500	2131,396	0	1
22858,53	31500	8641,47	0	1
25697,22	31500	5802,777	0	1
26712,19	31500	4787,808	0	1
19493,66	31500	12006,34	0	1
25693,6	31500	5806,401	0	1
30217,01	31500	1282,992	0	1
25883,42	31500	5616,575	0	1
31430,78	31500	69,22294	0	1
26912,4	31500	4587,599	0	1
22377,52	31500	9122,477	0	1
27406,2	31500	4093,8	0	1
26140,61	31500	5359,395	0	1
27403,94	31500	4096,062	0	1
23602,08	31500	7897,917	0	1
21630,27	31500	9869,726	0	1
29932,16	31500	1567,835	0	1
25896,28	31500	5603,723	0	1
26683,41	31500	4816,591	0	1
24087,95	31500	7412,046	0	1
24040,4	31500	7459,604	0	1
26067,27	31500	5432,733	0	1
...
...
...
...
27157,18	31500	4342,825	0	1
25591,27	31500	5908,729	0	1
26424,33	31500	5075,668	0	1

Jumlah RNG	4000
Jumlah Berhasil	3656
Jumlah Gagal	344
PoF	0,086

RNG Equivalent stress (psi)	Yield Strength, 0,9 SMYS (psi)	MK (psi)	Status	
24481,91	31500	7018,09	0	1
26457,82	31500	5042,181	0	1
17472,7	31500	14027,3	0	1
25485,82	31500	6014,177	0	1
23838,48	31500	7661,524	0	1
35235,45	31500	-3735,45	0	0
28314,11	31500	3185,886	0	1
22347,48	31500	9152,515	0	1
23796,96	31500	7703,038	0	1
30829,39	31500	670,6054	0	1
26528,81	31500	4971,191	0	1
26185,35	31500	5314,654	0	1
27388,63	31500	4111,374	0	1
26648,5	31500	4851,503	0	1
32088,32	31500	-588,316	0	0
30217,29	31500	1282,707	0	1
27187,33	31500	4312,675	0	1
24643,83	31500	6856,17	0	1
27599,25	31500	3900,751	0	1
31834,09	31500	-334,086	0	0
22771,56	31500	8728,44	0	1
30312,2	31500	1187,798	0	1
29188,61	31500	2311,385	0	1
25678,19	31500	5821,808	0	1
24891,46	31500	6608,537	0	1
26269,92	31500	5230,085	0	1
16835,4	31500	14664,6	0	1
...
...
...
...
24210,19	31500	-24210,2	0	0
23557,86	31500	-23557,9	0	0
23450,06	31500	-23450,1	0	0

Jumlah RNG	5000
Jumlah Berhasil	4562
Jumlah Gagal	438
PoF	0,088

RNG Equivalent stress (psi)	Yield Strength, 0,9 SMYS (psi)	MK (psi)	Status	
28237,69	31500	3262,307	0	1
25075,26	31500	6424,737	0	1
25273,68	31500	6226,318	0	1
27132,65	31500	4367,348	0	1
23921,99	31500	7578,013	0	1
23988,14	31500	7511,858	0	1
22612,71	31500	8887,293	0	1
25733,42	31500	5766,577	0	1
21413,15	31500	10086,85	0	1
25652,19	31500	5847,808	0	1
25967,84	31500	5532,165	0	1
25073,47	31500	6426,535	0	1
29447,85	31500	2052,15	0	1
28265,79	31500	3234,214	0	1
24757,46	31500	6742,538	0	1
27157,34	31500	4342,661	0	1
20370,56	31500	11129,44	0	1
23379,92	31500	8120,077	0	1
29095,84	31500	2404,156	0	1
28797,02	31500	2702,982	0	1
28682,22	31500	2817,781	0	1
20779,03	31500	10720,97	0	1
25899,29	31500	5600,714	0	1
28092,01	31500	3407,991	0	1
24133,41	31500	7366,59	0	1
26278,93	31500	5221,071	0	1
27211,12	31500	4288,878	0	1
...
...
...
...
28016,78	31500	3483,221	0	1
29015,47	31500	2484,529	0	1
22433,29	31500	9066,706	0	1

Jumlah RNG	6000
Jumlah Berhasil	5535
Jumlah Gagal	465
PoF	0,078

RNG Equivalent stress (psi)	Yield Strength, 0,9 SMYS (psi)	MK (psi)	Status	
24269	31500	7230,999	0	1
28824,57	31500	2675,435	0	1
29147,24	31500	2352,76	0	1
26488,65	31500	5011,349	0	1
18269,23	31500	13230,77	0	1
26940,18	31500	4559,821	0	1
27940,48	31500	3559,523	0	1
25916,8	31500	5583,197	0	1
24918,02	31500	6581,981	0	1
22935,5	31500	8564,5	0	1
31327,88	31500	172,1184	0	1
26689,59	31500	4810,407	0	1
25907,03	31500	5592,967	0	1
25194,98	31500	6305,017	0	1
30473,37	31500	1026,627	0	1
28405,18	31500	3094,82	0	1
28545,91	31500	2954,086	0	1
30256,83	31500	1243,174	0	1
24729,41	31500	6770,587	0	1
26944,86	31500	4555,14	0	1
26361,73	31500	5138,271	0	1
33338,9	31500	-1838,9	0	0
26791,22	31500	4708,775	0	1
26948,65	31500	4551,349	0	1
28073,02	31500	3426,984	0	1
24890,96	31500	6609,041	0	1
35361,06	31500	-3861,06	0	0
37867,39	31500	-6367,39	0	0
28165,69	31500	3334,306	0	1
23661,16	31500	7838,843	0	1
...
...
...
...
26838,11	31500	4661,892	0	1
24756,85	31500	6743,149	0	1
30026,2	31500	1473,795	0	1

Jumlah RNG	7000
Jumlah Berhasil	6428
Jumlah Gagal	572
PoF	0,082

RNG Equivalent stress (psi)	Yield Strength, 0,9 SMYS (psi)	MK (psi)	Status	
24874,06	31500	6625,937	0	1
25263,41	31500	6236,59	0	1
26475,67	31500	5024,325	0	1
25694,21	31500	5805,787	0	1
28230,72	31500	3269,282	0	1
20606,25	31500	10893,75	0	1
23857,07	31500	7642,93	0	1
24703,32	31500	6796,684	0	1
32131,26	31500	-631,263	0	0
22739,65	31500	8760,345	0	1
24528,96	31500	6971,036	0	1
30639,96	31500	860,0446	0	1
24301,06	31500	7198,937	0	1
30328,51	31500	1171,488	0	1
25948,33	31500	5551,673	0	1
27826,68	31500	3673,318	0	1
21059,37	31500	10440,63	0	1
28437,78	31500	3062,223	0	1
24163,12	31500	7336,876	0	1
19382,52	31500	12117,48	0	1
23720,19	31500	7779,811	0	1
27063,86	31500	4436,136	0	1
20290,75	31500	11209,25	0	1
19443,95	31500	12056,05	0	1
26617,96	31500	4882,035	0	1
26006,22	31500	5493,781	0	1
24943,82	31500	6556,185	0	1
27331,39	31500	4168,613	0	1
29631,72	31500	1868,28	0	1
24564,45	31500	6935,552	0	1
...
...
...
...
35023,59	31500	-3523,59	0	0
25371,57	31500	6128,431	0	1
32441,24	31500	-941,243	0	0

Jumlah RNG	8000
Jumlah Berhasil	7306
Jumlah Gagal	694
PoF	0,087

RNG Equivalent stress (psi)	Yield Strength, 0,9 SMYS (psi)	MK (psi)	Status	
30361,67	31500	1138,331	0	1
32749,06	31500	-1249,06	0	0
25994,28	31500	5505,716	0	1
27868,76	31500	3631,243	0	1
19246,35	31500	12253,65	0	1
24319,29	31500	7180,712	0	1
25641,19	31500	5858,814	0	1
22349,39	31500	9150,613	0	1
24924,93	31500	6575,067	0	1
30648,18	31500	851,8246	0	1
31881,18	31500	-381,177	0	0
26589,02	31500	4910,976	0	1
19622,59	31500	11877,41	0	1
24632,81	31500	6867,195	0	1
27154,92	31500	4345,084	0	1
22480,81	31500	9019,192	0	1
26072,42	31500	5427,577	0	1
27512,59	31500	3987,41	0	1
23180,29	31500	8319,713	0	1
26119,61	31500	5380,388	0	1
29656,25	31500	1843,749	0	1
25819,73	31500	5680,27	0	1
30222,26	31500	1277,741	0	1
29867,8	31500	1632,196	0	1
21224,17	31500	10275,83	0	1
19582,66	31500	11917,34	0	1
25878,15	31500	5621,848	0	1
26191,64	31500	5308,361	0	1
23407,58	31500	8092,423	0	1
21557,64	31500	9942,361	0	1
...
...
...
...
32290,68	31500	-790,675	0	0
30042,58	31500	1457,424	0	1
33745,04	31500	-2245,04	0	0

Jumlah RNG	9000
Jumlah Berhasil	8295
Jumlah Gagal	705
PoF	0,078

RNG Equivalent stress (psi)	Yield Strength, 0,9 SMYS (psi)	MK	Status	
23091,44	31500	8408,556	0	1
24453,94	31500	7046,063	0	1
31535,41	31500	-35,4134	0	0
25728,25	31500	5771,75	0	1
29060,44	31500	2439,561	0	1
28004,85	31500	3495,146	0	1
25951,3	31500	5548,702	0	1
27354,65	31500	4145,347	0	1
23238,65	31500	8261,353	0	1
33379,78	31500	-1879,78	0	0
22834,6	31500	8665,4	0	1
25253,83	31500	6246,17	0	1
25676,39	31500	5823,613	0	1
20396,84	31500	11103,16	0	1
21891,73	31500	9608,266	0	1
33006,67	31500	-1506,67	0	0
28163,64	31500	3336,357	0	1
23274,83	31500	8225,165	0	1
24118,65	31500	7381,349	0	1
26517,64	31500	4982,36	0	1
22976,17	31500	8523,828	0	1
24415,47	31500	7084,527	0	1
28520,93	31500	2979,069	0	1
26461,13	31500	5038,871	0	1
26251,66	31500	5248,344	0	1
24166,74	31500	7333,256	0	1
30231,14	31500	1268,861	0	1
25373,76	31500	6126,238	0	1
25232,95	31500	6267,049	0	1
26857,66	31500	4642,338	0	1
...
...
...
...
25664,75	31500	5835,253	0	1
27598,52	31500	3901,48	0	1
26079,92	31500	5420,081	0	1

Jumlah RNG	10000
Jumlah Berhasil	9195
Jumlah Gagal	805
PoF	0,081

RNG Equivalent stress (psi)	Yield Strength, 0,9 SMYS (psi)	MK (psi)	Status	
29454,01	31500	2045,986	0	1
30541,66	31500	958,344	0	1
27473,7	31500	4026,296	0	1
25329,1	31500	6170,904	0	1
30795,11	31500	704,8935	0	1
28158,38	31500	3341,622	0	1
24250,33	31500	7249,67	0	1
21788,31	31500	9711,693	0	1
23030,44	31500	8469,561	0	1
26876,83	31500	4623,167	0	1
22429,59	31500	9070,408	0	1
27866,69	31500	3633,309	0	1
30632,97	31500	867,0289	0	1
27239,23	31500	4260,765	0	1
29525,19	31500	1974,808	0	1
29192,95	31500	2307,053	0	1
25265,72	31500	6234,276	0	1
30118,64	31500	1381,359	0	1
32517,89	31500	-1017,89	0	0
23984,78	31500	7515,22	0	1
25903,53	31500	5596,47	0	1
32423,81	31500	-923,808	0	0
24429,79	31500	7070,205	0	1
22047,29	31500	9452,705	0	1
23636,18	31500	7863,823	0	1
30086,2	31500	1413,796	0	1
31114,51	31500	385,492	0	1
22638,62	31500	8861,377	0	1
23863,39	31500	7636,606	0	1
29936,78	31500	1563,219	0	1
...
...
...
...
30469,65	31500	1030,352	0	1
24665,85	31500	6834,155	0	1
30038,78	31500	1461,218	0	1

Jumlah RNG	11000
Jumlah Berhasil	10106
Jumlah Gagal	894
PoF	0,081

Lampiran C

Analisa Konsekuensi

Table 7-2—Properties of the BRD Representative Fluids

Fluid	Molecular Weight	Density lb/ft ³	Normal Boiling Point °F	Ambient State	Cp Gas Constant A	Cp Gas Constant B	Cp Gas Constant C	Cp Gas Constant D	Auto Ignition Temperature °F
C1-C2	23	5.639	193	Gas	12.3	1.150E-01	-2.870E-05	-1.300E-09	1,036
C3-C4	51	3.610	6.3	Gas	2.632	0.3188	1.347E+04	1.466E-08	696
C6-C8	100	42.702	210	Liquid	-5.146	6.762E-01	-3.651E-04	7.658E-08	433
C9-C12	149	45.823	364	Liquid	-8.5	1.010E+00	-5.560E-04	1.180E-07	406
C13-C16	205	47.728	502	Liquid	-11.7	1.390E+00	-7.720E-04	1.670E-07	396
C17-C25	280	48.383	651	Liquid	-22.4	1.940E+00	-1.120E-03	-2.530E-07	396
C25+	422	56.187	981	Liquid	-22.4	1.940E+00	-1.120E-03	-2.530E-07	396
H ₂	2	4.433	-423	Gas	27.1	9.270E-03	-1.380E-05	7.650E-09	752
H ₂ S	34	61.993	-75	Gas	31.9	1.440E-03	2.430E-05	-1.180E-08	500
HF	20	60.370	68	Gas	29.1	6.610E-04	-2.030E-06	2.500E-09	32,000
Water	18	62.3	212	Liquid	32.4	0.001924	1.05E-05	-3.6E-07	n/a
Steam	18	62.3	212	Gas	32.4	0.001924	1.05E-05	-3.6E-07	n/a
Acid (low)	18	62.3	212	Liquid	32.4	0.001924	1.05E-05	-3.6E-09	n/a
Acid (med.)	18	62.3	212	Liquid	32.4	0.001924	1.05E-05	-3.6E-09	n/a
Acid (high)	18	62.3	212	Liquid	32.4	0.001924	1.05E-05	-3.6E-09	n/a
Aromatics	104	42.7314	293.3	Liquid	-28.25	0.6159	-4.02E-04	9.94E-08	914
Styrene	104	42.7314	293.3	Liquid	-28.25	0.6159	-4.02E-04	9.94E-08	914

Note: Reid, Robert C, et. al., *The Properties of Gases and Liquids*, 4th Edition, McGraw-Hill, New York, 1987.

7.3.1 Pipe Hole Size Selection

Piping uses the standard four hole sizes: $\frac{1}{4}$ -inch, 1-inch, 4-inch, and rupture, provided the diameter of the leak is less than, or equal to, the diameter of the pipe itself. For example, a 1-inch pipe can have only two hole sizes, $\frac{1}{4}$ -inch and rupture, because the largest possible choice is equivalent to the 1-inch hole size. A 4-inch pipe can have three: $\frac{1}{4}$ -inch, 1-inch, and rupture, for the same reason.

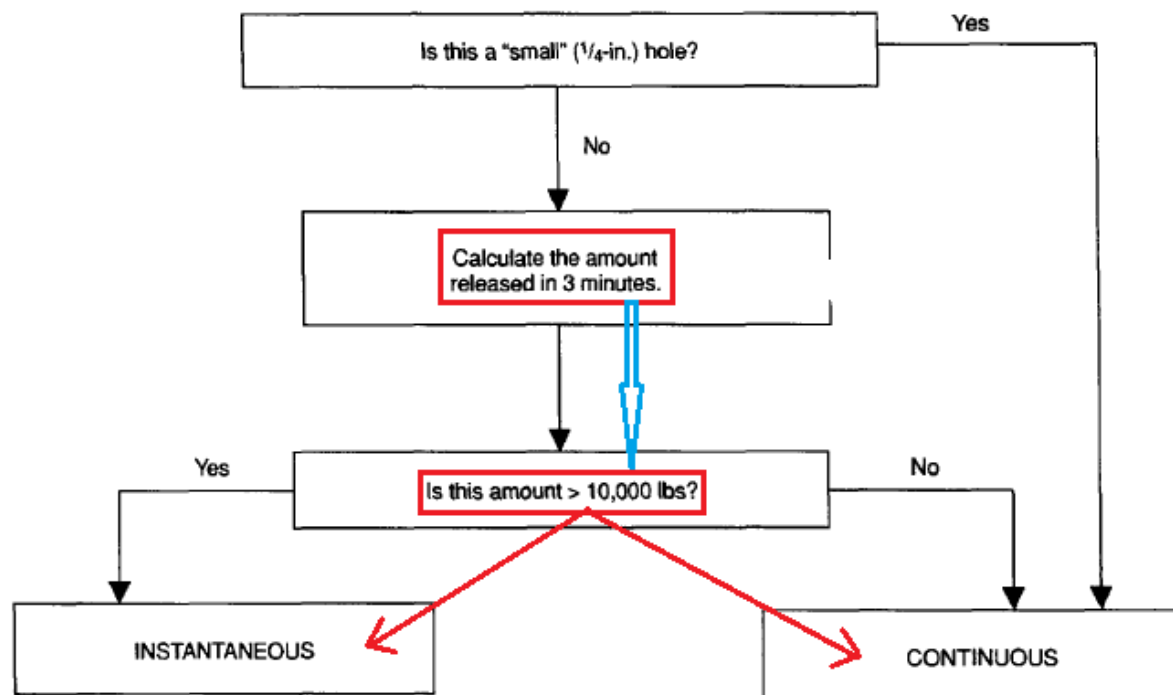


Figure 7-2—Process to Determine the Type of Release

Table 7-8—Continuous Release Consequence Equations—Auto Ignition Not Likely^a

Material	Final Phase Gas		Final Phase Liquid	
	Area of Equipment Damage (ft ²)	Area of Fatalities (ft ²)	Area of Equipment Damage (ft ²)	Area of Fatalities (ft ²)
C ₁ –C ₂	$A = 43 x^{0.98}$	$A = 110 x^{0.96}$		
C ₃ –C ₄	$A = 49 x^{0.98}$	$A = 125 x^{0.96}$		
C ₅	$A = 25.2 x^{0.98}$	$A = 62.1 x^{1.00}$	$A = 536 x^{0.90}$	$A = 1544 x^{0.90}$
C ₆ –C ₈	$A = 29 x^{0.98}$	$A = 68 x^{0.96}$	$A = 182 x^{0.89}$	$A = 516 x^{0.89}$
C ₉ –C ₁₂	$A = 12 x^{0.98}$	$A = 29 x^{0.96}$	$A = 130 x^{0.90}$	$A = 373 x^{0.89}$
C ₁₃ –C ₁₆			$A = 64 x^{0.90}$	$A = 183 x^{0.89}$
C ₁₇ –C ₂₅			$A = 20 x^{0.90}$	$A = 57 x^{0.89}$
C ₂₅ +			$A = 11 x^{0.91}$	$A = 33 x^{0.89}$
H ₂	$A = 198 x^{0.992}$	$A = 614 x^{0.933}$		
H ₂ S	$A = 32 x^{1.00}$	$A = 52 x^{1.00}$		
HF				
Aromatics	$A = 121.39 x^{0.8911}$	$A = 359 x^{0.8821}$		
Styrene	$A = 121.39 x^{0.8911}$	$A = 359 x^{0.8821}$		

Note: Shaded area represents cases in which equations are nonapplicable.

x = total release rate, lb/sec.

A = area, ft².

^aNot likely if process temperature is less than auto ignition temperature plus 80°F.

Table 7-9—Instantaneous Release Consequence Equations—Auto Ignition Not Likely^a

Material	Final Phase Gas		Final Phase Liquid	
	Area of Equipment Damage (ft ²)	Area of Fatalities (ft ²)	Area of Equipment Damage (ft ²)	Area of Fatalities (ft ²)
C ₁ –C ₂	$A = 41 x^{0.67}$	$A = 79 x^{0.67}$		
C ₃ –C ₄	$A = 28 x^{0.72}$	$A = 57.7 x^{0.75}$		
C ₅	$A = 13.4 x^{0.73}$	$A = 20.4 x^{0.76}$	$A = 1.49 x^{0.85}$	$A = 4.34 x^{0.85}$
C ₆ –C ₈	$A = 14 x^{0.67}$	$A = 26 x^{0.67}$	$A = 4.35 x^{0.78}$	$A = 12.7 x^{0.78}$
C ₉ –C ₁₂	$A = 7.1 x^{0.66}$	$A = 13 x^{0.66}$	$A = 3.3 x^{0.76}$	$A = 9.5 x^{0.76}$
C ₁₃ –C ₁₆			$A = 0.46 x^{0.88}$	$A = 1.3 x^{0.88}$
C ₁₇ –C ₂₅			$A = 0.11 x^{0.91}$	$A = 0.32 x^{0.91}$
C ₂₅ +			$A = 0.03 x^{0.99}$	$A = 0.081 x^{0.99}$
H ₂	$A = 545 x^{0.657}$	$A = 982 x^{0.652}$		
H ₂ S	$A = 148 x^{0.63}$	$A = 271 x^{0.63}$		
HF				
Aromatics	$A = 2.26 x^{0.8227}$	$A = 10.5 x^{0.7583}$		
Styrene	$A = 2.26 x^{0.8227}$	$A = 10.5 x^{0.7583}$		

Note: Shaded area represents cases in which equations are nonapplicable.

x = total release mass, lb.

A = area, ft².

^aNot likely if process temperature is less than auto ignition temperature plus 80°F.

Table B-3—Consequence Area Categories

Consequence Category	Likelihood Weighted Average Area
A	$< 10 \text{ ft}^2$
B	$10 - 100 \text{ ft}^2$
C	$100 - 1,000 \text{ ft}^2$
D	$1,000 - 10,000 \text{ ft}^2$
E	$> 10,000 \text{ ft}^2$

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berikut kesimpulan yang dapat diambil berdasarkan hasil dari analisa dan pembahasan yang telah dilakukan:

1. Pembebanan yang terjadi pada dinding dalam *elbow section* yang ditinjau disebabkan karena adanya tekanan internal (P_i) dan kecepatan dari aliran fluida didalam pipa. Tekanan internal yang terjadi merupakan tekanan operasional yang berada pada rentang nilai 2400 psi sampai 3500 psi. Kecepatan aliran fluida pada dinding dalam *elbow section* meningkat akibat adanya perubahan geometri penampang alir secara drastis. Kecepatan rata-rata aliran fluida berada pada rentang 3 ft/s sampai 15 ft/s yang mengalami peningkatan pada setiap *elbow section*. Peningkatan kecepatan aliran fluida pada dinding dalam *elbow section* menyebabkan fenomena korosi-erosi internal pada dinding dalam *elbow section* cenderung lebih aktif dibandingkan dengan pada bagian pipa lurus. Oleh karenanya laju penipisan dinding dalam *elbow section* relatif lebih tinggi dibandingkan dengan pada bagian pipa lurus. Kombinasi antara tekanan operasional dan kecepatan laju korosi-erosi tersebutlah yang mempengaruhi kondisi moda kegagalan dari *elbow section* yang bersangkutan.
2. *Consequence level* untuk keempat *elbow section* adalah berada pada level B. *Likelihood category* untuk keempat *elbow section* adalah kategori 1. Tingkat risiko untuk keempat *elbow section* adalah berada pada tingkat rendah
3. Manajemen inspeksi yang paling efektif dan efisien untuk keempat *elbow section* yang dikaji adalah menggunakan metode inspeksi ultrasonic testing (U.T) dengan frekuensi inspeksi sebanyak 48 bulan (4 tahun) sekali dan luas area inspeksi kecil.

DAFTAR PUSTAKA

- API 581 Base Resource Document. 2000. *Risk Based Inspection*. American Petroleum Institute.
- API 580 Recommended Practice. 2002. *Risk Based Inspection*. American Petroleum Institute.
- Allhakaram, S. R., Zakaria, M. I., Derakhshani, M., Samadian, M., Rasaey, H. S., Razmjoo, A. 2015. "Investigation on corrosion rate a novel corrosion criterion for gas pipelines affected by dynamic star current". *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 26 (2015) 453-460.
- DNV OS – F101. 2008. *Integrity Management of Submarine Pipeline System*. Det Norske Veritas.
- Hameed, A., Khan, F., Ahmed, S. 2016. "A risk-based inspection and maintenance interval estimation considering human error". *Process safety and environmental protection* 100 (2016) 9-21.
- Huang, Y., and Ji, D. 2008. "Experimental study on seawater-pipeline internal corrosion monitoring system". *Sensors and actuators B: Chemical*. Vol. 135 : 375-380.
- Ilman, M.N., and Kusmono. 2014. "Analysis of internal corrosion in subsea oil pipeline". *Journal of engineering failure analysis*.
- Khalajestani, M. K., Bahaari, M. R., Salehi, A., Shahbazi, S. 2015. "Predicting pressure capacity of pipe containing single defects". *Applied ocean research* 53 (2015) 15-22.
- Lassen, T. 2013. "Risk based fatigue inspection planning – state of the art". *5th fatigue design conference, fatigue design 2013*: 489-499.
- Lin, N., Lan, H. I., Xu, Y. G., Cui, Y., Barber, G. 2015. "Coupled effects between solid particles and gas velocities on erosion of elbows in natural gas pipelines". *The 7th world congress on particle technology (WCPT7)* 102 (2015) 893-903.

- Muslimu, F. A., 2012. “Analisa aliran udara pada elbow proto x-1 menggunakan CFD”. *Skripsi Jurusan Teknik Mesin FT UI*.
- Negara, W. P., 2007. “Perbandingan analisis pressure drop pada pipa lengkung 90° standar ANSI B36.10 dengan COSMOSfloWork2007”. *Skripsi Jurusan Teknik Mesin Guna Darma*.
- Palmer, A.C., King, R.A. 2008. *Subsea Pipeline Engineering*. Oklahoma. PennWell Corporation.
- Ryu, S.T., Park, Y.S., Bae, D.H. 2011. “Nondestructive assessment of elbow wall-thinning in a pipe system”. *Procedia Engineering* 10 (2011) 2639-2644.
- Republik Indonesia. 1998. *Undang-Undang No. 84. K Tahun 1998 tentang Pedoman dan Tatacara Pemeriksaan Keselamatan Kerja atas Instalasi, Peralatan Teknik yang Dipergunakan Dalam Usaha Pertambangan Minyak dan Gas Bumi dan Pengusahaan Sumberdaya Panas Bumi*. Peraturan Menteri Pertambangan dan Energi Tahun 1998. Sekretariat Negara. Jakarta.
- Seo, J.W., Cui, Y., Mohd, M.H., Ha, Y.C., Kim, B.J., Paik, J.K. 2015. “A risk-based inspection planning method for corroded subsea pipelines”. *Ocean Engineering* 109 (2015) 539-552.
- Shanbi, P., Zhaoxiong, Z. 2015. “An experimental study on the internal corrosion of a subsea multiphase pipeline”. *Petroleum* (2015). S2405-6561 (15) 00011-5.
- Shabarchin, O., Tesfamariam, S. 2016. “Internal corrosion hazard assessment of oil and gas pipelines using Bayesian network model”. *Journal of loss prevention in the process industries* 4239 (2016) 30025-0.
- Shinsesaz, M.R., Bajestani, M.N., Hashemi, S.J., and Shekari, E. 2013. ‘comparison of API 510 pressure vessels inspection planning with API risk-based inspection planning approach’. *International journal of pressure vessels and piping* 111-112 (2013): 202-208.
- Taufik, A. 2014. RBI dan M untuk mengelola integritas peralatan mekanik dan sistem bertekanan. Didapat dari: <http://iafmi.or.id/drupal/content/rbi-m-untuk-mengelola-integritas-peralatan-mekanik-dan-sistem-bertekanan>.

- Bai, Y., Bai, Q. 2010. *Subsea Structural Engineering*. New Jersey. Gulf Profesional Publishing.
- Zeng, L., Zhang, G.A., Guo, X.P. 2014. "Erosion-corrosion at different locations of x65 carbon steel elbow". *Corrosion science* 85 (2014) 318-330.
- Zhang, G.A., Zeng, L., Huang, H.L., Guo, X.P. 2013. "A study of flow accelerated corrosion at elbow of carbon steel pipeline by array electrode and computational fluid dynamics simulation". *Corrosion science* 77 (3013) 334-341.
- Zhaoyang, T., Jianfeng, L., Zongzhi, W., Jianhu, Z., and Weifeng, H. 2011. "An evaluation of maintenance strategy using risk based inspection". *Safetey science* 49 (2011) : 852-860.

BIODATA PENULIS



Herlan, lahir di Sukabumi – Jawa Barat pada 6 Mei 1992 sebagai anak keempat dari empat bersaudara. Penulis mengawali pendidikan formalnya di SDN Cihanjavar, kemudian melanjutkan ke MTs. Nurul Huda Cihanjavar, dan SMA Negeri 1 Nagrak. Penulis menempuh pendidikan tinggi di Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, ITS – Surabaya pada tahun 2012. Selama masa perkuliahan penulis aktif dalam organisasi Himpunan Mahasiswa Teknik Kelautan (HIMATEKLA) menjabat sebagai staff Departemen Pengembangan Sumber Daya Mahasiswa pada tahun 2013-2014. Penulis juga pernah menjabat sebagai Ketua Divisi Pelatihan Departemen PSDM HIMATEKLA masa jabatan 2014-2015. Selain itu, penulis juga pernah menjabat sebagai staff Bidang Pengembangan Sumber Daya Anggota UKM KOPMA ITS pada tahun 2013-2014. Penulis juga aktif sebagai Tim Pemandu Samudra FTK sejak tahun 2013-2015. Selama proses perkuliahan penulis pernah melaksanakan program Kerja Praktek selama 2 bulan di PJIT PT. Marindotech dan menyelesaikan *project* dengan judul “*Review Platform Cinta-P Milik CNOOC SEC Ltd. untuk Keperluan Rekualifikasi dan Resertifikasi*”.

Untuk memenuhi persyaratan menjadi sarjana program studi S-1 Jurusan Teknik Kelautan ITS penulis mengambil Tugas Akhir dengan judul “*Manajemen Inspeksi Pada Elbow Section Milik PT. Pertamina EP Field Sangasanga Kalimantan Timur Akibat Internal Corrosion-Erosion Menggunakan Metode Risk Based Inspection (RBI)*”. Penulis dapat dihubungi melalui email herlansubagio@yahoo.co.id.